

**Adhäsionskräfte von Artikulationsgipsen an
Typ 3 und 4 Modellgips.
Eine in vitro Studie**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Dr. med. dent.

an der Medizinischen Fakultät
der Universität Leipzig

eingereicht von: Julian Brückner, Zahnarzt

Geburtsdatum / Geburtsort: 13.06.1987 / Leisnig

angefertigt an: Universität Leipzig, Medizinische Fakultät
Universitätszahnmedizin Leipzig
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und
Werkstoffkunde

Betreuer: Prof. Dr. med. dent. Holger A. Jakstat

Beschluss über die Verleihung des Doktorgrades vom: 19.05.2015

Bibliografische Beschreibung

Brückner, Julian

Adhäsionskräfte von Artikulationsgipsen an Typ 3 und 4 Modellgips.

Eine in vitro Studie

Universität Leipzig, Dissertation

60 S., 65 Lit., 39 Abb., 14 Tab.

Referat:

Artikulationsgips dient der sicheren Verankerung von zahnärztlichen Gipsmodellen im Kausimulator. Eine Norm zur Quantifizierung der Haftfähigkeit von diesen speziellen Dentalgipsen an Gipsmodellen existiert bisher nicht. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, Unterschiede zwischen Artikulationsgipsen bezüglich ihrer Adhäsion an Modellgipsen festzustellen und die neu entwickelte Methode zu bewerten. Zur Untersuchung wurden die Artikulationsgipse dentona[®] arti-base[®] 60, picodent[®] A 50, AmannGirrbach Artifix[®] und KerrTM Snow White Plaster No. 2 an einen Typ 3 (dentona[®] dento-dur[®] 110) und Typ 4 Gips (dentona[®] sockel-plaster[®] GT 160) gegossen. Die zylindrischen Prüfkörper enthielten zentrisch eingegossene Retentionen, die zur Verankerung in einer Universalprüfmaschine dienten. Prüfkörper aus Typ 3 und Typ 4 Gips wurden vor dem Angießen des Artikulationsgipses 48 h getrocknet. Die Messung der Adhäsionskraft erfolgte mittels Zugversuch, 1 h nach der Erstarrung des Artikulationsgipses. Für jede Kombination wurden 10 Versuche durchgeführt. Aus den 80 ermittelten Werten konnte ein Ranking der Gipskombinationen erstellt werden. Es zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Kombinationen von Modell- und Artikulationsgips. Anhand der Ergebnisse kann abgeleitet werden, dass die neue Methode für die Untersuchung der Haftfähigkeit von Artikulationsgipsen geeignet ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	2
2.1	Begriffsdefinition	2
2.2	Gips als Roh- und Werkstoff in der Geschichte	2
2.3	Einteilung von Gips	5
2.3.1	Naturgips	5
2.3.2	Chemiegips	6
2.3.3	Das chemische System $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$	7
2.3.4	Beeinflussung der chemischen Reaktionen	11
2.4	Dentalgips	12
2.4.1	Anforderungen	13
2.4.2	Gipsoberflächen	14
3	Ziel der Untersuchung	17
4	Material und Methode	18
4.1	Material	18
4.1.1	Modellgipse	18
4.1.2	Artikulationsgipse	20
4.1.3	Rohre zur Formherstellung	23
4.1.4	Tiefziehfolie	23
4.1.5	Geräte	24
4.2	Methode	26
4.2.1	Gipsverarbeitung	26
4.2.2	Gipsretentionen	27
4.2.3	Formherstellung	30
4.2.4	Herstellung der Prüfkörper	30

4.2.5	Versuchsdurchführung	36
4.2.6	Statistische Auswertung	36
5	Ergebnisse	37
6	Diskussion	43
6.1	Diskussion der Methode	43
6.1.1	Auswahl der Gipse	43
6.1.2	Anfertigung der Prüfkörper	43
6.1.3	Versuchsdurchführung	44
6.2	Diskussion der Ergebnisse	45
7	Schlussfolgerungen	49
8	Zusammenfassung	50
9	Literaturverzeichnis	52
10	Anhang	61

Abkürzungsverzeichnis

®	Registered Trade Mark
Abb.	Abbildung
CEN	Europäische Komitee für Normung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Diameter Nominal (Nenndurchmesser)
EN	Europäische Normen
ISO	Internationale Organisation für Normung
KFO	Kieferorthopädie
p	Signifikanzwert
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
Tab.	Tabelle
™	Unregistered Trade Mark

1 Einleitung

Gips stellt innerhalb der Zahnmedizin einen unverzichtbaren Werkstoff dar. Man findet ihn als Form- und Modellmaterial, sowie als Bestandteil von Einbettmassen in nahezu jedem Gebiet der Zahntechnik. Als Hilfsstoff dient er neben der Herstellung von zahnärztlichen Gipsmodellen zugleich auch deren Verankerung im Artikulator (Kausimulator). Die Befestigung ist eine Grundvoraussetzung für zahnmedizinische Analysen und Diagnostika sowie zahntechnische Arbeiten auf den Modellen. Auch in Zeiten einer fortschreitenden Digitalisierung zahnärztlicher und -technischer Arbeiten bleibt das montierte Gipsmodell nahezu alternativlos.

Für die Modellfixierung bietet die Industrie spezialisierte Gipsorten an, welche sich vor allem durch geringe Expansion und gute Haftfähigkeit auszeichnen sollen (dentona AG; AmannGirrbach GmbH 2011). Meist werden diese Artikulationsgipse anhand ihrer Dimensionsänderung gemessen, da dies mit einer Veränderung der montierten Modelle zueinander einhergeht. Bezüglich der Haftfähigkeit von Artikulationsgipsen an Modellen und Sockelplatten liegen derzeit noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor. Dabei ist gerade diese Eigenschaft von großer Bedeutung. Häufig ist ein Abriss an der Grenzfläche zwischen verschiedenen Gipsen dafür verantwortlich, dass sich das Modell aus dem Artikulator löst. Eine Remontage ist hierbei nicht in jedem Fall möglich, so dass häufig Präzision und Zeit verloren gehen.

Um der Ablösung vorzubeugen, werden in der Praxis Modelle und Sockel mit Retentionsmustern versehen. Diese eingegossenen oder gefrästen Muster sind jedoch nicht immer zielführend. Vorteilhaft wäre also ein Artikulationsgips, der ohne Veränderungen eine belastbare Bindung mit dem Modell und der Sockelplatte eingeht. Daher stellt sich die Frage, wie gut die Haftfähigkeit bei aktuellen Gipsen ausgeprägt ist und inwiefern sich gegenwärtige Gipskombinationen voneinander unterscheiden. Anhand einer Auswahl häufig verwendeter Artikulations- und Modellgipse soll der Verbund näher betrachtet werden.

2 Literaturübersicht

2.1 Begriffsdefinition

Benutzt man das Wort Gips, so kann man im deutschsprachigen Raum vieles darunter verstehen. Es existiert keine terminologische Differenzierung zwischen Natur- und Chemiegips oder gebranntem und abgebundenem Gips. In der anglo-amerikanischen Literatur wird der Begriff „gypsum“ für den natürlich vorliegenden Gipsstein verwendet und „plaster“ sowie „stone“ für den gebrannten Gips. Das Wort Gips stammt vom griechischen Wort „gypsos“, welches wiederum dem arabischen und hebräischen Sprachraum entlehnt wurde (Franz 1981; Wikipedia 2012).

Chemisch betrachtet, handelt es sich bei Gips um Calciumsulfat (CaSO_4), welches Kristallwasser (H_2O) in die Molekülstruktur eingelagert hat. Dabei können verschiedene Hydratationsstufen vorliegen. Natürlich vorzufindendes Gipsgestein ist ein Dihydrat, es enthält pro Calciumsulfatmolekül zwei Wassermoleküle ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). In der Natur sind auch kristallwasserfreie Calciumsulfate (Anhydrit CaSO_4) anzutreffen. Von besonderer Bedeutung für den dentalen Fachbereich sind allerdings die technisch hergestellten Alpha- und Beta-Halbhydrate des Gipses ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) (Forg et al. 2009).

2.2 Gips als Roh- und Werkstoff in der Geschichte

Gips zählt zu den ältesten Werk- und Baustoffen der Menschheit. Die Verwendung von Gips lässt sich bis in das 7. Jahrtausend vor Christus zurückverfolgen. So diente der Werkstoff in Form von Putz als Untergrund für Malereien. Der bisher älteste Nachweis stammt aus der Jungsteinzeitsiedlung Catal Huyuk in der heutigen Türkei. Dort fanden sich Fresken auf einem zuvor aufgetragenen gipshaltigen Untergrund (Abb. 1).



Abb. 1 Gipsputzschichten mit Bemalung in Catal Huyuk (Bundesverband der Gipsindustrie e.V. 2012)

Die Bürger von Jericho im alten Palästina verwendeten Gipsmörtel für Wände, Fußböden und deren Verzierungen. Auch in den Keilschriften der Sumerer (ca. 2800 v. Chr.) und Babylonier (ca. 1830 v. Chr.) finden sich Hinweise für die Verwendung von Gips (Bundesverband der Gipsindustrie e.V. 2012). In diesen und späteren Kulturen spielten Mischungen mit Gips eine wichtige Rolle als Baumaterial oder künstlerisch gestaltbarer Werkstoff. Unter anderen nutzten die Ägypter beim Bau der Chephren-Pyramide (ca. 2550 v. Chr.) Gips-Kalk-Mörtel zum Schließen senkrechter Fugen zwischen den verwendeten Kalksteinen. Auch in der minoischen Kultur des alten Kreta (ca. 3000 v. Chr.) fand Gips für die Gestaltung von Wänden Verwendung, zum Beispiel im Palast von Knossos auf der Insel Kreta. In der Antike zeugen Abhandlungen des griechischen Philosophen und Naturforscher Theophrastos von Eresos (371–287 v. Chr.) über den wichtigen Baustoff Gips, von dem damaligen Wissensstand zur Gipsherstellung und -anwendung. Gaius Plinius Secundus Maior (23-79 n. Chr.), auch als Plinius der Ältere bekannt, beschrieb in seinem umfassenden Werk „Naturalis historia“ die An- und Verwendung von Gips im alten Rom. Er berichtet in seiner Schrift über Gipsabformungen des menschlichen Gesichtes, die anschließend mit Wachs ausgegossen wurden. Diese dienten wahrscheinlich als Totenmasken (Bundesverband der Gipsindustrie e.V. 2012). Um 970 n. Chr. verwendete der arabische Medizingelehrte Abu Mansur Muwaffak als erster Gipsverbände, um Knochenbrüche zu therapieren. Diese Methodik fand in

Europa erst im 18. Jahrhundert unter dem persönlichen Chirurgen Napoleons, Jean Dominique Larrey, Anwendung (Franz 1981).

Die Verwendung von Gips in der Baugeschichte entwickelte sich ab dem 11. Jahrhundert mit dem Baustil der Romanik in Europa weiter. Typisch war der Gebrauch von Gips als Bestandteil von Mörtel, Putz oder auch plastisch gestalteten Dekorelementen wie Stuckarbeiten und Kunstmarmor. Diese erlebten besonders im 17. Jahrhundert mit dem Barockstil ihre Blütezeit (Franz 1981). Im darauffolgenden Jahrhundert wurde erstmals eine für die Zahnmedizin entscheidende Erfindung beschrieben. Der Hofarzt des Preußenkönigs Friedrich II., Philipp Pfaff (1713–1766), schilderte in seinen 1756 erschienenen „Abhandlungen von den Zähnen des menschlichen Körpers und deren Krankheiten“ „das Ausgießen einer Wachsabformung mit einem Teig aus feingepulvertem Gips mit Wasser“ (Hoffmann-Axthelm 1985; Kappert und Eichner 2008). Diese bedeutende Idee, Modelle für Zahnersatz aus Gips herzustellen, ebnete den Weg der zahnärztlichen Prothetik für die Zukunft. Mit der beginnenden Industrialisierung im 18. Jahrhundert erfolgte kontinuierlich die wissenschaftliche und technische Erarbeitung der Gipstechnologie. Seit dieser Zeit unterscheidet man eindeutig zwischen Anhydrit, Di- sowie Halbhydrat und der Bedeutung der unterschiedlichen Brenntemperaturen und -bedingungen (Bundesverband der Gipsindustrie e.V. 2012). 1840 gelang es den Amerikanern L. Gilbert und W. H. Dwinelle erstmals mit Salzzusätzen die Abbindung von Gips zu beschleunigen. Sie erhielten damit ein geeignetes Abformmaterial für die korrekte Darstellung von Gebissituationen (Kappert und Eichner 2008; Linderer 1851). Die maßgeblichen Entwicklungen in den folgenden Jahrzehnten brachten eine Steigerung der Festigkeitseigenschaften (1899), die Entwicklung des dentalen Hartgipses und des reinen, synthetischen Gipses (1966) hervor. Je nach Verwendungszweck erfolgten mittels Zusätzen und Stellmitteln spezielle Abstimmungen des Gipses, die zur Optimierung der Eigenschaften dienten. Bis zum heutigen Tag hat sich Gips als Modellwerkstoff bewährt. Alternative zahntechnische Modellmaterialien wie Polymethacrylsäuremethylester (PMMA), Epoxidharze oder Silico-Phosphat-Zemente (Steinzement) konnten sich bislang nicht gegen Gips durchsetzen (Kappert und Eichner 2008; Ernst und Caesar 1993). Zwar boten diese Werkstoffe diverse Vorteile gegenüber Gips, meist bewährten sich diese jedoch durch einen hohen Verarbeitungs- und Materialaufwand in der Praxis nicht (Kappert und Eichner 2008).

2.3 Einteilung von Gips

2.3.1 Naturgips

Das weltweite natürliche Gipsvorkommen wird auf mehrere Billionen Tonnen (10^{12} t) geschätzt. Davon werden jährlich ca. 100 Millionen Tonnen gefördert. In diesen mineralischen Anreicherungen liegt der Naturgips als Halbhydrat (Bassanit), Dihydrat oder Anhydrit vor (Weiss und Bräu 2009). Fast alle Vorkommen sind durch Sedimentation in großen flachen Salzwasserseen entstanden. Besonders in Randbereichen dieser Wasserflächen, wo die Verdunstung begünstigt war, konnten sich Salze konzentrieren. Durch langandauernde schichtweise Ablagerungs- und Umwandlungsprozesse entstanden so die heutigen Gips- und Anhydritvorkommen (Kappert und Eichner 2008). Große europäische Lagerstätten befinden sich im Pariser Becken, rund um das Mittelmeer, in Thüringen sowie dem Harz. Die jeweiligen Rohgipse unterscheiden sich dabei durch ihren Reinheitsgrad. Häufig finden sich Unterschiede in Beimengungen von Kalk, Ton, Dolomit oder Eisenoxid, welche zur Farbvarianz des Gipses von grau über rot-bräunlich bis zu schwarz führen können. Daraus ergeben sich zahlreiche Typen Rohgips, die entsprechend ihrer späteren Verwendung industriell aufgearbeitet werden (Franz 1981). Eine besondere Erscheinung von Gips in der Natur ist die Sandrose (Abb. 2). Sie entsteht in heißen Wüstengebieten durch schnell verdunstendes Grundwasser. Die im verdampfenden Wasser gelösten Salze kristallisieren aus und bilden mit Sandkörnern die charakteristische Form aus (Schorn 2013).



Abb. 2 Sandrose

2.3.2 Chemiegips

Calciumverbindungen mit Schwefelsäure, die als Nebenprodukte der Industrie anfallen, werden als Chemiegipse oder synthetische Gipse bezeichnet. Große Mengen fallen unter anderem bei der Phosphorsäureherstellung (150 Millionen Tonnen pro Jahr), Raugasentschwefelung (45 Millionen Tonnen pro Jahr) und Citronensäureherstellung an (Weiss und Bräu 2009; Pitzschke 2004). Häufig enthalten die dabei entstehenden Chemiegipse organische und anorganische Verunreinigungen, welche die für den Gips geforderten Eigenschaften negativ beeinflussen. So entstehen meist sehr viel kleinere Gipskristalle als bei natürlichem Gips, was die spätere Festigkeit stark reduzieren kann. Um Chemiegipse einer gezielten Verwendung zuführen zu können, sind umfangreiche Reinigungs- und Umkristallisierungsprozesse erforderlich. Da diese einen hohen technischen und damit finanziellen Aufwand erfordern, werden aktuell nur 3 bis 4 % des anfallenden synthetischen Gipses weiter verarbeitet. Der Großteil wird hingegen deponiert (Pitzschke 2004). Durch moderne Filteranlagen ist es jedoch inzwischen möglich, den bei der Entschwefelung von Kraftwerksabgasen entstehenden REA-Gips (Rauchgasentschwefelungsanlagengips) als Rohstoff zu nutzen. Die präzise Steuerung der Rauchgasentschwefelung und Optimierung der anschließenden Reinigung des Rohstoffs, ermöglicht eine verwertbare Reinheit und Qualität (Hamm et al. 2004). Seit 1993 zählt REA-Gips deshalb nicht länger zum Abfall der Kraftwerksindustrie. Mittels umgerüsteter oder neu errichteter Gipswerke werden aus diesem Gips hauptsächlich Gipsplatten für die Baubranche produziert, unter Beimischung von natürlichem Gips entstehen aber auch Putzgipse und Fließestriche. Perspektivisch wird REA-Gips den natürlichen Rohstoff aber nicht ablösen. Für viele Anwendungen bleibt natürlicher Gips deshalb unverzichtbar (Hamm et al. 2004).

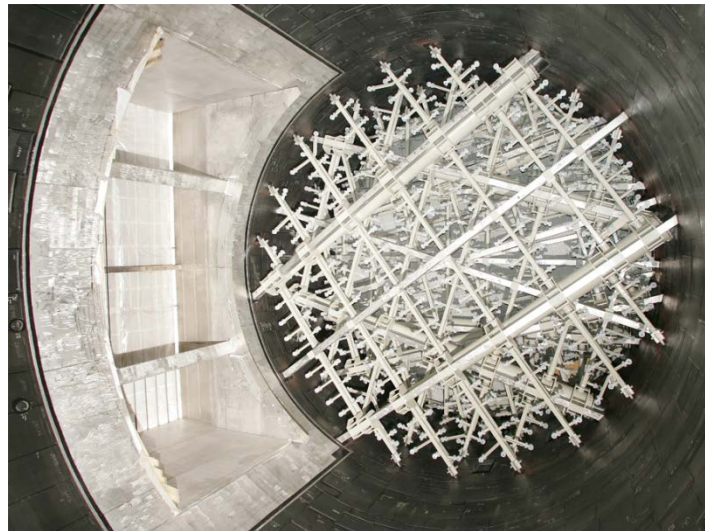


Abb. 3 Rauchgasentschwefelungsanlage eines Steinkohlekraftwerks (Bundesverband der Gipsindustrie e.V. 2013)

2.3.3 Das chemische System $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$

Alle Erscheinungsformen des Gipses, vom Rohprodukt über das Pulver bis hin zum abgebundenen Gips, entstammen dem $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ -System. Insgesamt unterscheidet man 5 verschiedene Modifikationen (Franz 1981; Kappert und Eichner 2008):

- | | |
|---|--|
| 1. Calciumsulfat-Dihydrat | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ |
| 2. Calciumsulfat-Halbhydrat | $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ |
| 3. Anhydrit III (löslicher Anhydrit) | CaSO_4 |
| 4. Anhydrit II (natürlicher Anhydrit) | CaSO_4 |
| 5. Anhydrit I (Hochtemperatur-Anhydrit) | CaSO_4 |

Calciumsulfat-Dihydrat ist das Ausgangsprodukt für das Brennen und das Endprodukt nach dem Abbinden des Gipses.

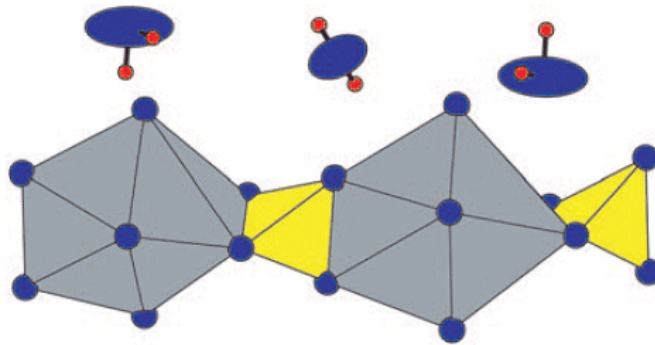


Abb. 4 Beispielhaftes Calciumsulfat-Halbhydrat Gipsmolekül (Weiss und Bräu 2009)

Vor dem Vermischen mit Wasser liegt Gips als Calciumsulfat-Halbhydrat vor (Abb. 4). Dabei unterscheidet man zwischen den Formen Beta- und Alpha-Halbhydrat. Beide unterscheiden sich in ihren Eigenschaften und in ihrer Herstellungsweise. Liegt Calciumsulfat ohne Wassermoleküle vor, handelt es sich um Anhydrit. Anhydrit II und III sind wie das Halbhydrat in der Lage unterhalb von 40 °C Wasser aufzunehmen und dadurch höhere Hydratationsstufen zu erreichen (Kappert und Eichner 2008). Anhydrit I existiert nur bei einer Temperatur von über 1180 °C in einem instabilen Zustand (Franz 1981). Die drei aufgeführten Anhydrit-Phasen unterscheiden sich nicht chemisch sondern durch ihre Kristallstruktur.

Die verschiedenen Kristallarten von Gips entstehen durch Dehydratations- und Rehydratationsvorgänge im CaSO_4 - H_2O -System (Tab. 1). Der Vorgang der Dehydratation beschreibt den Prozess, in dem aus Gipsstein gebrannter Gips entsteht. Ausgangsprodukt ist dabei immer Calciumsulfat-Dihydrat, welches industriell in Calciumsulfat-Halbhydrat überführt wird. Je nach Herstellungsprozess entsteht dabei das bereits erwähnte Beta- oder Alpha-Halbhydrat. Beta-Halbhydrat entsteht beim Brennen zwischen 120 und 180 °C in einer trockenen Atmosphäre und erhält dadurch flockige, zerklüftete Teilchen, die aus sehr feinen, nadelartigen Einzelkristallen bestehen (Abb. 5). Brennt man das Dihydrat hingegen bei Temperaturen von 80 bis 150 °C in einem Autoklaven mit einem Druck von ca. 4 bis 5 bar entsteht Alpha-Halbhydrat. Es wird auch vom sogenannten „nassen“ Brennen (hoher Wasserdampf-Partialdruck) gesprochen. Dabei entstehen grobkristalline und kompaktere Partikel (Abb. 6) (Franz 1981; Kappert und Eichner 2008). Besonders große Alpha-Halbhydratkristalle entstehen im Autoklaven durch Kochen des Gipses in Calciumchlorid-Lösung. Das aufgearbeitete Halbhydrat dient als Ausgangsstoff für dentale Superhartgipse. Durch Unterschiede in der spezifischen Kristalloberfläche

und -größe ergeben sich Differenzen im Reaktionsverhalten, der Löslichkeit sowie der Expansion und Härte nach der Rehydratation (Franz 1981; Kappert und Eichner 2008). In ihrer rhomboiden Grundkristallstruktur sind Alpha- und Beta-Halbhydrate allerdings identisch.

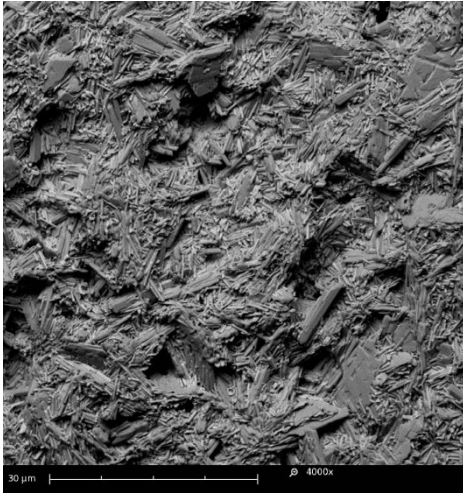


Abb. 5 Gips aus Betahalbhydrat

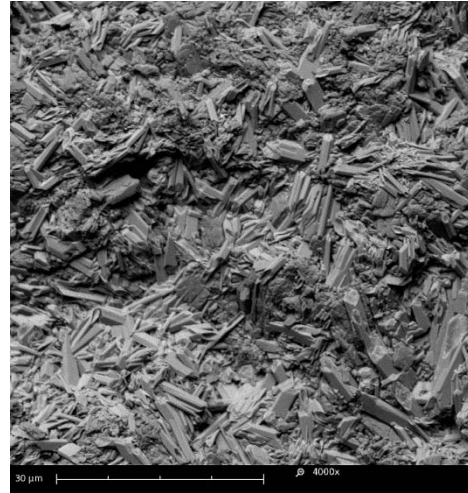


Abb. 6 Gips aus Alphahalbhydrat

Bei der Rehydratation handelt es sich um die Vermengung von gebranntem Gips mit Wasser. Je nach Kristallform und Partikelgröße des Gipses wird unterschiedlich viel Wasser für das Abbinden benötigt (Beta-Halbhydrat 40 bis 60 ml, Alpha-Halbhydrat 19 bis 25 ml Wasser pro 100 g Gipspulver). Rein stöchiometrisch beträgt der Wasserbedarf zum Abbinden von 100 g Gipspulver 18,7 ml Wasser (Kappert und Eichner 2008). Um jedoch die Fließfähigkeit des Gipsbreis zu gewährleisten, wird ein zusätzlicher Überschuss Anmischwasser von bis zu 80 % benötigt. Dies beruht auf der unterschiedlich großen spezifischen Oberfläche der Alpha- und Betahalbhydratkristalle. Zwischen den Gipskristallen lagert sich das nicht in Dihydrat gebundene Wasser als sogenanntes interkristallines Wasser ein, welches später verdunstet. Die Reaktion von Halbhydrat in Dihydrat verläuft dabei ohne Zwischenstufen. Beginnend mit einzelnen Kristallisationskeimen entwickeln sich während dieser exothermen Reaktion interkristalline Netzwerke, die zur Erstarrung des Gipsbreis führen. Die nadelförmigen Gipskristalle verfilzen mit zunehmender Größe untereinander und sorgen so für die zunehmende Verfestigung (Lenz und Welker 1972). Der physikalische Prozess der Erstarrung tritt meist vor der vollständigen chemischen Abbindung ein. Diese ist erst mit der Abgabe der Hydratationswärme vollständig abgeschlossen. Mit der Erstarrung beginnt die

Expansion des Gipses. Durch die gegenseitige Verdrängung der wachsenden Dihydratkristalle erhöht sich der nach außen gerichtete Druck und führt so zur Ausdehnung (Franz 1977, 1979). Diese Expansion erreicht je nach Sorte und Typ ihr Maximum 8 bis 24 h nach der Erstarrung. Anschließend kommt es zu einer Kontraktion des Gipses, welche auf der Verdunstung des interkristallinen Wassers beruht. Abhängig von Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit kann der Vorgang 5 bis 7 Tage andauern. Danach ist Gips bei gleichbleibenden Umweltbedingungen dimensionsstabil (Kappert und Eichner 2008).

Tab. 1 Dehydrations- und Rehydrationsvorgänge von Gips

Dehydration		
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} + \text{Energie}$	\longrightarrow	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + 1\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$
Rehydratation		
$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + 1\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	\longrightarrow	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} + \text{Energie}$

Eine Vielzahl von Untersuchungen beschäftigt sich mit der Struktur und Symmetrie des CaSO_4 -Halbhydrats. Frühe Untersuchungen zum Halbhydrat zeigen, dass nicht immer genau $\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ im Kristallgitter gebunden ist. Belegungen des Moleküls mit 0,46 H_2O bis 0,75 H_2O wären stufenlos möglich (Abriel und Nesper 1993; Weiss und Bräu 2009; Zimmermann 1991). Aktuelle Untersuchungen konnten mittels Röntgendiffraktometrie und komplexen Rechenmodellen feststellen, dass in der Struktur des Halbhydrates genau $\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ pro Formeleinheit Gips eingelagert ist (Weiss und Bräu 2009). Deshalb wird im folgenden Text der Begriff Halbhydrat für das oft beschriebene Subhydrat verwendet.

2.3.4 Beeinflussung der chemischen Reaktionen

Durch sogenannte Stellmittel und veränderte Umweltbedingungen ist es möglich, das Abbinden und Expansionsverhalten des Gipses zu beeinflussen. So ist es möglich, je nach Einsatzgebiet, Gips auf die gewünschten Anforderungen abzustimmen.

Die Erstarrungszeit wird laut Franz (1981) durch folgende Punkte beeinflusst:

- Wasser-Gipspulver-Verhältnis: Je weniger Wasser verwendet wird, umso schneller bindet Gips ab.
- Chemische Zusätze (Stellmittel): Beispielsweise sorgen Kaliumsulfat und Kochsalz für eine Beschleunigung der Abbindereaktion, Borax (Natriumborat) sowie anorganische Säuren (zum Beispiel Schwefelsäure) und deren Salze wirken hingegen verlangsamen.
- Temperatur: Liegt die Temperatur des Anmischwassers über 30 °C oder weit unter Raumtemperatur, verlangsamt sich die Erstarrung des Gipses.
- Mischvorgang von Wasser und Gips: Erhöht sich die Intensität und die Dauer des Mischvorgangs, so verkürzt sich die Erstarrungszeit. Wird Gips zu lang gerührt, verzögert sie sich („totgerührt“).
- Verunreinigungen: Bereits abgebundener Gips (Calciumsulfat-Dihydrat) im Halbhydrat-Gipspulver (zum Beispiel an Rührbechern etc.) beschleunigt die Erstarrung.
- Kristallgröße des Gipses: Kleine Kristalle können sich schneller lösen und bilden mehr Kristallisationskeime aus. Wodurch der Gips schneller erstarrt.

Eine Beschleunigung der Erstarrung durch Stellmittel beruht auf einer erhöhten Löslichkeit und Lösungsgeschwindigkeit der Gipskristalle sowie einer vermehrten Kristallisationskeimbildung. Die Verzögerer verhindern hingegen die Bildung von Kristallisationskeimen, die Vernetzung der entstehenden Dihydratkristalle oder senken die Lösungsgeschwindigkeit des Gipses im Wasser.

Die Beeinflussung der Gipsexpansion erfolgt durch das Mischungsverhältnis Wasser-Gips und durch chemische Zusätze. Wird weniger Wasser als empfohlen verwendet, steigt die Abbindeexpansion. Durch Zugabe von Calciumsulfat oder Seignettesalz (Kalium-Natrium-Tartrat-Tetrahydrat, ein spezielles Salz der Weinsäure) kann die Ausdehnung von Gips verringert werden. Mit diesen Zusätzen

wird jedoch auch die Festigkeit des abgebundenen Gipses verringert (Franz 1981). Die Stellmittel lassen relativ kleine Kristallformen entstehen, welche den Raumbedarf und somit die Abbindeexpansion deutlich reduzieren. Mit der verkleinerten Kristallform ist aber auch die reduzierte Festigkeit zu erklären (Kappert und Eichner 2008).

2.4 Dentalgips

Gips findet im Bereich der Zahnmedizin und Zahntechnik ein sehr breites Anwendungsgebiet. Er ist Bestandteil von zahntechnischen Einbettmassen und zahnärztlichen Abformmaterialien wie Alginat. Vor allem ist Gips aber der wichtigste Modellwerkstoff. Dentalgips bezeichnet das Produkt aus Calciumsulfat-Halbhydrat und den enthaltenen Stellmitteln (Geschmacks- und Farbstoffe mit inbegriffen) (Materialnorm EN ISO 6873). Moderne expansionsarme Modellgipse verfügen zudem über Anteile wasserlöslicher Kunstharze, welche man auch als kunststoffvergütet bezeichnet. Diese Gipse sind als zahntechnische Modellwerkstoffe speziell auf das jeweilige Anwendungsgebiet abgestimmt.

In der derzeit gültigen EN ISO 6873:2000 wird Gips in folgende Typen unterschieden:

- Typ 1: Abdruckgips
- Typ 2: Modellgips
- Typ 3: Modellhartgips
- Typ 4: Superhartgips für Formen, geringe Expansion
- Typ 5: Superhartgips für Formen, hohe Expansion

Typ 1 Abdruckgips ist speziell auf intraorale Abformung von vorzugsweise zahnlosen Kiefern abgestimmt. Das Beta-Halbhydrat zeichnet sich durch eine schnelle Abbindezeit, niedrige Bruchfestigkeit und saubere Bruchkanten zur leichten Repositionierung aus. Alabastergips vom Typ 2 ist ebenfalls ein Beta-Halbhydrat, das aber durch eine höhere Druckfestigkeit und größere Abbindeexpansion charakterisiert ist. Meist findet Typ 2 Gips Verwendung als Artikulationsgips oder zur Anfertigung von Vorwällen bei zahntechnischen Reparaturen. Zur Herstellung von Modellen ist er dagegen nicht geeignet. Für Gegenkiefermodelle sowie

Arbeitsmodelle von Teil- und Totalprothesen verwendet man Typ 3 Modellgips. Dieser bietet für die genannten Anwendungen eine ausreichend hohe Präzision und Druckfestigkeit. Typ 3 Gips kann aus Alpha- oder Beta-Halbhydrat hergestellt sein. Auch Mischungen beider Kristallformen werden von den Herstellern verwendet. Typ 4 Superhartgips ist ein Alpha-Halbhydrat, welcher im Gegensatz zu den erstgenannten Typen eine sehr hohe Detailwiedergabe und mechanische Belastbarkeit aufweist. Anwendung findet Typ 4 Gips bei Sägemodellen und Meistermodellen für die Kronen- beziehungsweise Modellgusstechnik (Kappert und Eichner 2008). Für zahntechnische Einbettmassen, bei denen eine erhöhte Abbindeexpansion erwünscht ist, kommt Typ 5 Gips zum Einsatz.

2.4.1 Anforderungen

Um Gips in der Zahntechnik verwenden zu können, muss er spezielle Anforderungen erfüllen. Dazu zählen nach Franz (1981):

- ausreichende Verarbeitungs- und Erstarrungszeit
- hohe Detailwiedergabe
- hohe Dimensionsstabilität
- gute Fließfähigkeit während der plastischen Phase
- keine nachhaltigen Veränderungen durch Kontakt mit anderen Materialien (zum Beispiel: Abformmassen, Wachs etc.)
- hohe Abriebfestigkeit
- ausreichende Druck- und Biegefestigkeit
- Biokompatibilität
- Wirtschaftlichkeit

Wie bereits unter 2.4 beschrieben richten sich die aufgeführten Anforderungen nach dem jeweiligen Verwendungszweck. In der EN ISO 6873:2000 für Dentalgipse sind die einzelnen Prüfverfahren charakterisiert, die zur Kategorisierung der einzelnen Gipse dienen. Unter anderen erfolgt die Prüfung auf Erstarrungszeit, lineare Abbindeexpansion, Druckfestigkeit und Detailwiedergabe. Für Typ 1 Gips wird weiterhin die zu erwartende Fließfähigkeit beim Einfüllen sowie das Bruchverhalten beschrieben. Die zu erreichenden Werte sind entweder festgelegt oder müssen sich

in einem Toleranzbereich der vom Hersteller angegebenen Werte befinden. Die vorgeschriebene Abbindeexpansion und Druckfestigkeit verdeutlichen die Qualitätsunterschiede der einzelnen Gipstypen (Tab. 2).

Tab. 2 Abbindeexpansion und Druckfestigkeit von Dentalgipstypen

Typ	Abbindeexpansion [%]	Druckfestigkeit [MPa]	
		min.	max.
1	0 bis 0,15	4,0	8,0
2	0 bis 0,30	9,0	-
3	0 bis 0,20	20,0	-
4	0 bis 0,15	35,0	-
5	0,16 bis 0,30	35,0	-

Artikulationsgips ist in keiner Norm näher spezifiziert. Es handelt sich meist um speziell für die Modellmontage abgestimmten Typ 2 Gips. Dabei bewerben die Hersteller meist eine geringe Abbindeexpansion, schnelles Abbinden und eine hohe Haftfähigkeit am Modell. Letztere lässt sich aber bisher nicht quantifizieren.

2.4.2 Gipsoberflächen

Die Oberfläche von Dentalgips spielt eine entscheidende Rolle für die Detailwiedergabe und Härte der zahnärztlichen Modelle. Bereits das verwendete Abformmaterial und die anschließende Behandlung vor dem Ausgießen der Abformung hat einen Einfluss auf die entstehende Gipsoberfläche (Breker und Förster 1996; Vogel et al. 1998). So zeigen sich durch Verwendung verschiedener Desinfektionslösungen und Entspannungsmittel Unterschiede in der Härte und Detailwiedergabe des Gipsmodells (Bader 2012; Kuske 2000). Auch das Mischungsverhältnis Wasser - Gips beeinflusst diese Eigenschaften. Durch die Verdunstung des interkristallinen Wassers entstehen im ausgehärteten Gips Poren. Verwendet man mehr Wasser als empfohlen, entstehen größere Porositäten die die Festigkeit reduzieren (Franz 1981).

In einer Untersuchung von Zimmermann (1991) konnte festgestellt werden, dass die oberflächlichen Gipskristalle sich je nach Abformmaterial unterschiedlich ausrichten. So begünstigen Silikonmassen eine Anordnung der Gipskristalle, die die Oberflächenhärte positiv beeinflusst. Durch Orientierung der kleinsten Kristallfläche zur Oberfläche erhöht sich die spätere Härte. Alginat-Abformmassen beeinflussen diese Strukturen weniger stark. Weiterhin zeigte sich, dass die Gipsoberfläche nicht ausschließlich aus Dihydrat besteht. Mittels Röntgendiffraktometrie konnten Subhydratkristalleinschlüsse nachgewiesen werden (Abb. 7). Diese erhöhen bei zahlreichem Vorkommen die Härte des Gipses (Zimmermann 1991; Wolf et al. 1998).

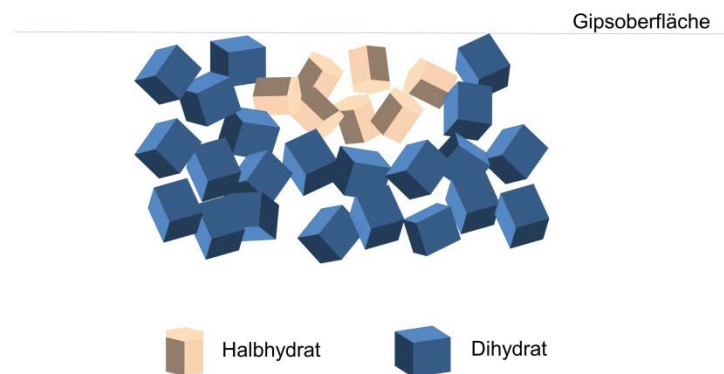


Abb. 7 Modellhafte Oberflächenkristallstruktur

Inwieweit diese Beobachtungen zur Gipsoberfläche den Verbund Gips-Gips (Abb. 8) betreffen, ist aus der aktuellen Literatur nicht ersichtlich. Um den Verbund zweier Gipse zu verbessern, wird in der Praxis die makroskopisch glatte Gipsoberfläche mit Retentionen versehen, meist mit Hilfe von Strukturfolien oder individuell gefrästen Retentionsmustern. Durch diese eingearbeiteten Unterschnitte soll die mechanische Retention erhöht werden. Weit verbreitet ist auch die Wässerung des fertigen Gipsmodells vor dem Auftrag des Artikulationsgipses. Inwieweit dies den Verbund verbessert ist fraglich. Nachgewiesen ist jedoch, dass die Wässerung Oberflächenhärte und Detailwiedergabe durch Kristallumwandlungen und -lösung reduziert (Breker und Förster 1996; Kuske 2000; Zimmermann 1991).



Abb. 8 Gipsgrenzfläche aus abgebundenem Beta- und Alphahalbhydrat

3 Ziel der Untersuchung

Aus dem dargestellten Forschungsstand wird ersichtlich, dass bisher noch keine Untersuchung zur Haftfähigkeit von Artikulationsgipsen an Modellgipsen durchgeführt worden ist. Eine Norm oder Methode, um die Haftkräfte von Gipsen zu untersuchen, ist ebenfalls nicht bekannt.

Um diese Eigenschaft des spezialisierten Gipses zu erfassen, muss zunächst eine geeignete Methode entwickelt werden. Diese sollte leicht durchführbar sein und reproduzierbare Ergebnisse liefern.

Auf Grundlage dieser Methode kann dann ein Vergleich von vier handelsüblichen Artikulationsgipsen gegen einen Typ 3 sowie einen Typ 4 Modellgips erfolgen. Damit sollen Aussagen bezüglich unterschiedlicher Haftkräfte und günstiger Gipskonstellationen getroffen werden.

Weiterhin ist es Ziel der Untersuchung, die neu entwickelte Methode anhand der durchgeführten Versuche zu bewerten und Ansätze für die Erklärung des Haftverbundes Gips-Gips zu finden.

4 Material und Methode

4.1 Material

4.1.1 Modellgipse

Als Modellgips wurde jeweils ein Typ 3 und ein Typ 4 Gips nach EN ISO 6873:2000 ausgewählt. Beide Gipstypen sind in jedem Dentallabor gebräuchlich und werden je nach Indikation verwendet. Arbeitsmodelle zur Kronenherstellung werden häufig aus Superhartgips Typ 4 hergestellt. Für Kunststoffarbeiten sind die Modelle hingegen meist aus Hartgips Typ 3 gefertigt (Marxkors 2010). Die technischen Daten werden tabellarisch zusammengefasst (4.1.1.3).

4.1.1.1 dentona dento-dur® 110

Der dento-dur® 110 (dentona AG, Dortmund) ist ein "Spezial-Hartgips" vom Typ 3 (nach DIN EN ISO 6873:2000). Der Hersteller beschreibt sein Produkt als schnell abbindend und „für KFO, Kunststoffprothetik, Reparatur- und Situationsmodelle“ (dentona AG) geeignet. Es handelt sich um einen vielfach verwendeten Modellgips, der im Versuch Gegenkiefer-, einfache Arbeits- und Situationsmodelle simuliert. Laut Hersteller ist dieser Gips ein Gemisch aus Alpha- und Betahalbhydrat, wobei der Anteil des Betahalbhydrats, je nach Farbe, zwischen 0 und 30 % liegen kann (dentona AG).

4.1.1.2 dentona® sockel-plaster® GT 160

Dieser Typ 4 Gips (DIN EN ISO 6873:2000) ist speziell für die Herstellung von Modellsockeln vorgesehen. Dabei soll die geringe Expansion und die flüssige Konsistenz laut Hersteller für „passgenaue und spannungsfreie Modellsockel“ (dentona AG) sorgen. Weiterhin eigne sich der Gips auch „für Splitcast und für superglatte Konter in der Kunststoffprothetik“ (dentona AG). Da vor allem Sockel mit sockel-plaster® GT 160 (dentona AG, Dortmund) gefertigt werden und diese später

mit dem Artikulationsgips eine Grenzfläche bilden, ist er für den Versuch besonders geeignet. Der Rohgips besteht aus kunststoffvergütetem Alpha-Halbhydrat.

4.1.1.3 Technische Daten

Tab. 3 Herstellertangaben des Typ 3 und Typ 4 Gipses

Hersteller	dentona®	
Produkt	dento-dur® 110	sockel-plaster® GT 160
Konsistenz	thixotrop	dünnflüssig
Farbe	blau	citrusgelb
Geruch	vanille	vanille
Typ nach EN ISO 6873:2000	3	4
Anmischverhältnis auf 100 g Pulver [ml]	30	24
Rührzeit manuell [s]	30	-
Rührzeit unter Vakuum [s]	30	60
Verarbeitungszeit [min]	5-6	8- 9
Abbindezeit [min]	8-9	13-14
Härte (Rockwell) 30 min [N/mm²]	~ 80	~ 130
Härte (Rockwell) 60 min [N/mm²]	~ 100	~ 150
Härte (Rockwell) 24 h [N/mm²]	> 110	> 160
Druckfestigkeit 1 h [MPa]	~ 40	~ 60
Druckfestigkeit 24 h [MPa]	> 40	> 70
Abbindeexpansion [%]	< 0,15	< 0,06

4.1.2 Artikulationsgipse

Artikulationsgips ist speziell auf die Montage von Modellen im Artikulator abgestimmt. Dabei wird besonders auf niedrige Expansionswerte, hohe Haftfähigkeit und leichte Verarbeitung Wert gelegt. Die ausgewählten Artikulationsgipse finden im Raum Leipzig am häufigsten Anwendung. Dies ergab eine telefonische Befragung von 20 Dentallaboren in und um Leipzig (interne Recherche, unveröffentlicht). Sie stellen damit typische Vertreter von Artikulationsgipsen in dieser Region dar. Die ausgewählten Produkte sind vom jeweiligen Hersteller speziell für die Modellmontage ausgeschrieben. Die technischen Daten sind tabellarisch zusammengefasst (Tab. 4).

4.1.2.1 dentona[®] arti-base[®] 60

Der arti-base[®] 60 (dentona AG, Dortmund) ist ein „schnell abbindender Spezial-Artikulationsgips [...] mit erhöhter Klebekraft“ und eignet sich für die „präzise Montage von Modellen im Artikulator“ (dentona AG). Durch eine relativ kurze Abbindezeit des Gipses soll eine zügige Weiterverarbeitung ermöglicht werden. Als weiteres Produktmerkmal wird die geringe Expansion hervorgehoben. Laut Herstellerangaben wird dies durch den ausschließlichen Einsatz von Alpha-Halbhydrat bedingt.

4.1.2.2 picodent[®] A 50

Die Firma picodent[®] beschreibt den Artikulationsgips A 50 (picodent[®] GmbH, Wipperfürth) als bewährten Gips mit „sahniger Konsistenz und hervorragenden Expansionswerten“ (picodent[®]). Weiterhin zeichne sich der Gips durch eine „benutzerfreundliche Verarbeitungsbreite“ (picodent[®]) aus. Das heißt, neben der Montage von Modellen ist er auch für die Anfertigung von Kontern und Vorwällen geeignet. Der Artikulationsgips A 50 stellt einen Typ 2 Gips dar (nach DIN EN ISO 6873:2000).

4.1.2.3 AmannGirrbach artifix®

Der artifix® (AmannGirrbach AG, Koblach) bietet ein weites Anwendungsspektrum. So ist dieser, laut Hersteller, nicht nur zur Montage von Modellen geeignet, sondern auch zur Unterfütterung von KFO-Modellen, Frässockelfixierung, Bissregistrierung und Herstellung von Vorwällen. Desweiteren beschreibt AmannGirrbach den Artikulationsgips als schnell abbindend, klumpfrei und sahnig. Auch die geringe Abbindeexpansion zeichne den artifix® aus (AmannGirrbach GmbH 2011).

4.1.2.4 Kerr™ Snow White Plaster No. 2

Der Snow White Plaster No. 2 (KerrItalia S.r.l., Salerno, Italien) ist ein Typ 1 Gips (DIN EN ISO 6873:2000). Er eignet sich laut Kerr neben der Modellmontage unter anderem auch zur Kieferabformung und Herstellung von Lötmodellen und Vorwällen. Weiterhin zeichne sich der Gips durch eine hohe Zeichnungsschärfe aus (Kerrdental; KerrHawe S.A. 2010).

4.1.2.5 Technische Daten

Tab. 4 Herstellerangaben der Artikulationsgipse

Hersteller	dentona [®]	picodent [®]	AmannGirrbach	Kerr [™]
Produkt	arti-base [®] 60	A 50	Artifix [®]	Snow White Plaster No. 2
Konsistenz	standfest	standfest	standfest	standfest
Farbe	weiß	weiß	weiß	weiß
Geruch	vanille	geruchlos	geruchlos	Mintgeruch
Typ nach EN ISO 6873:2000	2	2	3	1
Anmischverhältnis auf 100 g Pulver [ml]	30	30	30	94
Rührzeit manuell [s]	30	-	-	60
Rührzeit unter Vakuum [s]	30	20	30	30
Verarbeitungszeit [min]	2-3	2,5	3	1,25
Abbindezeit [min]	4- 5	-	4	3-5
Härte (Rockwell) 30 min [N/mm ²]	~ 50	-	-	-
Härte (Rockwell) 60 min [N/mm ²]	-	-	-	-
Härte (Rockwell) 24 h [N/mm ²]	> 60	~ 50	50	-
Druckfestigkeit 1 h [MPa]	~ 25	-	-	-
Druckfestigkeit 24 h [MPa]	> 25	~ 20	20	≥ 25
Abbindeexpansion [%]	< 0,04	< 0,04	0,03	0,12

4.1.3 Rohre zur Formherstellung

Für die Formgebung der Gipsprüfkörper kamen 30 mm und 60 mm lange Hochtemperaturrohrstücke (HT-Rohre) zum Einsatz (Marley Deutschland GmbH, Wunstorf). Die aus Polypropylen (DIN 4102/B1) hergestellten Rohre eignen sich durch die hohe Widerstandsfähigkeit gegen Säuren, Laugen, Salze und Wärme besonders für die Verwendung mit Gips. Mit der Nennweite DN 75 haben HT-Rohre nach DIN EN 1451-1 einen Außendurchmesser von 75 mm und einen Innendurchmesser von 71 mm. Daraus ergibt sich eine Querschnittsfläche von 39,59 cm². Die Teilung der Rohre in die erforderlichen Längen erfolgte in einem kunststoffverarbeitenden Betrieb mit einer wassergekühlten Kreissäge (Firma Kunert Kunststoffbau, Großweitzschen). Auf diese Weise wurde eine rechtwinklige Trennung der HT-Rohrstücke sichergestellt.

4.1.4 Tiefziehfolie

Die verwendeten, 0,75 mm starken und 120 mm breiten Tiefziehfolien Omnidur glasklar (Artikelnummer: 81128) des Herstellers Omnident[®] (Dental-Handelsgesellschaft mbH, Rodgau Nieder-Roden) sind aus Polyethylenenterephthalat mit Glycol (PETG) hergestellt. Sie bieten eine ebene und glatte Oberfläche, die keine Bindung mit dem Gips eingeht. Um die Kontaktfläche für die Prüfkörper immer gleich zu gestalten, kam für jede Probe eine neue Tiefziehfolie als Unterlage zum Einsatz.

4.1.5 Geräte

4.1.5.1 Degussa Multivac[®] 4

Das Vakuumanrührgerät der Firma Degussa (Hanau-Wolfgang) diente dem Mischen aller Gipsproben. Dabei kam der dazugehörige große Rührbecher mit Rührwerk zum Einsatz. Der Multivac[®] 4 erreicht ein Vakuum von ca. 10 mbar und bewegt das Mischgut mit 350 Umdrehungen pro Minute. Gestartet wurde der Mischvorgang des Gipses erst, wenn das Vakuumeter im grünen Bereich stand. Die Rührzeit richtete sich nach den Herstellervorgaben (siehe Technische Daten der Gipse 4.1.1.3 und 4.1.2.5).

4.1.5.2 Gips-Rüttler

Um den Gips gleichmäßig und blasenfrei in die Form einzubringen, wurde der Rüttler VIBRO 4 (Artikelnummer: AVIB04) der Firma Simed (Baranzate, Italien) verwendet. Die Intensität der Vibration lässt sich am Gerät regeln. Für den durchgeführten Versuch wurde die niedrigste Vibrationsstufe gewählt.

4.1.5.3 Waage

Zum präzisen Abwiegen des Gipses wurde die Waage LP6200S des Herstellers Sartorius AG, Göttingen, verwendet. Das Abmessen des jeweiligen Gipses erfolgte auf ein Gramm genau.

Tab. 5 Technische Daten der Waage

Ablesbarkeit	0,01 g
Wägebereich	6200 g
Tarierbereich (subtraktiv)	-6200 g
Reproduzierbarkeit	$\leq \pm 0,01$ g
Linearitätsabweichung	$\leq \pm 0,02$ g
Empfindlichkeit zwischen +10...+30 °C	$\leq \pm 2 \times 10^{-6}$ /K
Messzeit	1,5 s

4.1.5.4 Trockenschrank

Zur gleichmäßigen Trocknung der Typ 3 und Typ 4 Gipsprüfkörper diene ein Trockenschrank (VEB MLW Dentalfabrik, Treffurt, WST 5010 Nr. 016990). Das Gerät verfügt über eine Heizleistung von 1200 W und wurde für den Versuch auf eine Temperatur von 37 °C eingestellt. Die Abluftklappe an der Geräterückseite stand dabei offen, um einen Anstieg der Luftfeuchtigkeit im Trockenraum zu vermeiden. Kontrolliert wurde die Temperatur über das am Trockenschrank integrierte Quecksilberthermometer.

4.1.5.5 Universaltestmaschine

Zur Messung der Kraft, die für die Trennung der aneinander gegossenen Gipse notwendig ist, wurde eine Universaltestmaschine (Zwick Roell GmbH & Co. KG, Ulm, 2010) verwendet. Für den Versuch wurde der 10 kN-Kraftmesser installiert. Die Befestigung der Proben erfolgte mit dem Probenhalter Typ 8322. Über die dazugehörige Software testXpert II Version 2.2 erfolgte die notwendige Programmierung der Universaltestmaschine. Für den Zugversuch wurden die Parameter in der Prüfvorschrift („Zugversuch Typ 3/4 - Arti-Gips“) wie in Tab. 6 angegeben.

Tab. 6 Einstellungen der Prüfvorschrift

Einspannlänge bei Startposition	66 mm
Vorkraft	5 N
Probenform	Rundprobe
Probendurchmesser	71 mm
Parallele Probenlänge	60 mm
Prüfgeschwindigkeit	0,75 mm/min
Prüfergebnisse	Zugfestigkeit [MPa] Kraftmaximum [N]

4.2 Methode

4.2.1 Gipsverarbeitung

Die Verarbeitung der Gipse erfolgte nach den jeweiligen Herstellervorgaben. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte war bei jedem Gips gleich. Die verwendeten Wassermengen und Verarbeitungszeiten entsprachen den Herstellerangaben, die in den Technischen Daten (siehe 4.1.3 und 4.2.5) aufgeführt sind. Für die Herstellung jeder einzelnen Form wurden 200 g des jeweiligen Gipspulvers benötigt. Weiterhin kam destilliertes Wasser zur Verwendung. Um einen möglichst homogenen Gipsbrei zu erhalten, fand das Anmischen maschinell statt. Dies sorgt für eine verminderte Porosität und erhöhte Festigkeit (Franz 1981).

Die einzelnen Schritte der Gipsverarbeitung umfassen:

1. destilliertes Wasser mit einer Genauigkeit von 1 ml mittels Messzylinder abmessen,
2. Gipspulver abwiegen und langsam in das Wasser einstreuen,
3. 20-30 Sekunden den Gips sumpfen lassen,
4. manuell sorgfältig spateln (5-10 Sekunden),
5. Gipsbecher mit Rührwerk an Vakuumrührgerät anbringen, Start des Rührwerkes erst bei vollständig erreichtem Vakuum,
6. Rührzeit nach Herstellerangaben,
7. Ausgießen der Form ohne den Gipsbecher auf den Rüttler abzustellen.

Durch die sehr kurze Abbindezeit des Kerr™ Snow White Plaster No. 2 wurde die Probenherstellung wesentlich erschwert. Um eine ausreichend lange Verarbeitungszeit zu gewährleisten, wurde bei diesem Gips abgekühltes destilliertes Wasser (4 °C) verwendet.

4.2.2 Gipsretentionen

4.2.2.1 Vorversuche

Durch Vorversuche sollte geklärt werden, welche Retentionen geeignet sind, die Prüfkörper sicher mit der Universaltestmaschine zu verbinden. Dabei musste die Retention den Zugkräften bis zum Abriss der Gipsoberflächen standhalten. Die ersten Versuche wurden mit einer Aluminiumgrundplatte, die drei im Gips eingelassene M5 Maschinenschrauben sowie eine zentrale M8 Maschinenschraube enthielt, durchgeführt (Abb. 9). Dabei diente die zentrale Schraube der Fixierung in der Universaltestmaschine. Alle auf diese Weise durchgeführten Vorversuche führten nicht zum gewünschten Erfolg. Es kam nicht zum Abriss an den Gipsoberflächen sondern zum Bruch innerhalb des Artikulationsgipskörpers. In der weiterentwickelten Version wurden die im Gips eingelassenen M5 Maschinenschrauben mit Unterlegscheiben am Schraubenkopf versehen (Abb. 10). Damit konnte nun reproduzierbar der Abriss an den Gipsoberflächen erzeugt werden.



Abb. 9 Prüfkörperretention



Abb. 10 Prüfkörperretention, Vorversuch

Da es sich um eine materialaufwendige und schwer justierbare Apparatur handelte, empfahl sich eine Vereinfachung. Der Austausch der im Gips eingelassenen Schrauben gegen ein Kleinmaschen Streckgitter (RAU Streckgitter GmbH, Sinsheim, Artikel-Nr. 016/1505) und der Verzicht auf die Aluminiumgrundplatte brachte die gewünschte Weiterentwicklung (Abb. 11). In den durchgeführten Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass mit dieser Apparatur ein Abriss an den Gipsoberflächen erfolgte.

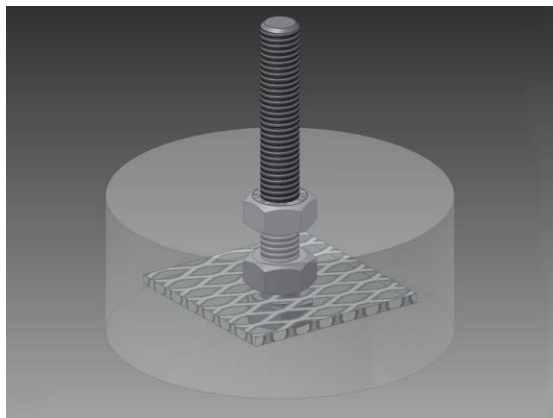


Abb. 11 Finale Prüfkörperretention

4.2.2.2 Verwendete Retention mit Arretierhilfe

Um einen Angriffspunkt an der Gipsform für den Zugversuch zu schaffen, wurde eine Retention aus einer Maschinenschraube und einer Gitterplatte konstruiert. Eine vollverzinkte 60 mm lange M8 Maschinenschraube diente dabei als zentrales Halteelement. Am Schraubenkopf befand sich ein mit einer Mutter fixiertes 40x40 mm großes Streckgitter (RAU Streckgitter GmbH, Sinsheim, Artikel-Nr. 016/1505), welches später im Gips eingebettet ist (Abb. 11). Dabei betrug der Abstand zur Gipsangussfläche durch die justierte, zentrale Schraube stets 3 mm. Das freie Schraubenende diente als Angriffspunkt für die Universaltestmaschine im Zugversuch. Für die rechtwinklige und zentrische Einbettung der Gipsretention wurde eine Arretierhilfe hergestellt. Dazu diente eine 75x75x2 mm große Aluminiumplatte mit einer 8,5 mm großen zentrischen Bohrung, sowie vier quadratisch (Seitenlänge 55mm, Diagonale 77,8 mm) darum angeordnete M3 Schrauben. Eine der M3 Schrauben ist 20 mm lang, die anderen drei jeweils 16 mm (Abb. 12). Steckt man die Arretierhilfe mit Gipsretention auf das HT-Rohrstück, so fassen die M3 Schrauben das Rohr an der äußeren Oberfläche und arretieren die M8 Maschinenschraube zentrisch auf der Form (Abb. 13).

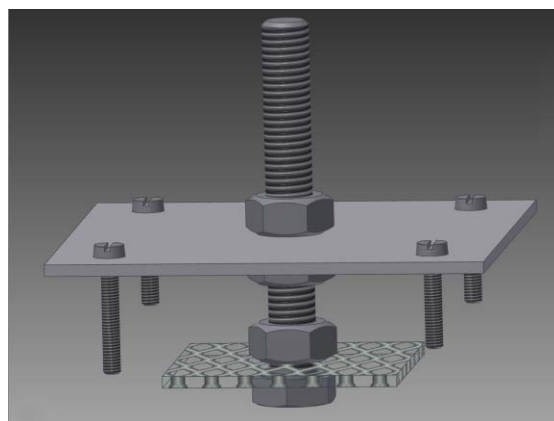


Abb. 12 Prüfkörperretention mit Arretierhilfe

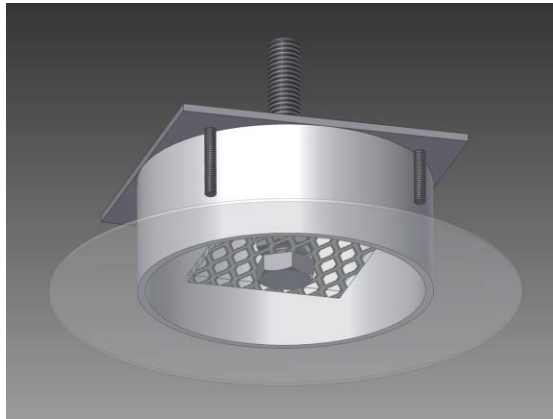


Abb. 13 Prüfkörperretention mit Arretierhilfe und Gipsform

4.2.3 Formherstellung

Zur Herstellung der Grundform aus Gips wurden die unter 4.1.3 erläuterten HT-Rohre verwendet. Die 30 mm langen Rohrstücke fanden Verwendung bei der Herstellung der Typ 3 bzw. Typ 4 Gipsformen, die 60 mm langen Rohrstücke beim Angießen des Artikulationsgipses. Vor Verwendung der Rohrstücke mussten diese entgratet werden. Die 60 mm Form wurde der Länge nach mittels einer dünnen Trennscheibe (Trennscheibe Komet 0,4 mm) aufgetrennt. Somit konnte die Form nach dem Aneinandergießen der Gipse leicht entfernt werden. Die Fixierung der 60 mm Form an den Prüfkörpern erfolgte mittels Rohrschellen. Weiterhin erhielten beide Formteile vor den Versuchsreihen mittels Rosenfräser eine Markierung auf der äußeren Oberfläche. Diese stellte sicher, dass bei jeder Probe das Rohr in der gleichen Position zur Arretierhilfe ausgerichtet wurde (Abb. 19).

4.2.4 Herstellung der Prüfkörper

Zuerst erfolgte die Herstellung der Hartgipsprüfkörper aus Typ 3 (dentona dento-dur® 110) und Typ 4 (dentona sockel-plaster® GT 160) Gips. Die dazu verwendete 30 mm hohe Form wurde für die spätere Entfernung vom Gips dünn mit Vaseline bestrichen (Abb. 14). Auf jeweils einer neuen, sauberen Tiefziehfolie erfolgte die Positionierung der vorbereiteten Form, die mittels eines Edelstahltrays

sicher auf dem Rüttler stabilisiert werden konnte (Abb. 15). Danach erfolgte das Anmischen des Typ 3 und Typ 4 Gipses entsprechend den Herstellervorgaben (Abb. 16). Unter Nutzung des Rüttlers (niedrige Intensität) konnte die Form gefüllt und die Arretierhilfe mit der angeschraubten Retention eingebracht werden (Abb. 17 und Abb. 18). Dabei musste besonderer Wert auf die korrekte Position von Retention zur Gipsform (Abb. 19) und eine zügige Arbeitsweise gelegt werden. Nach 30 min konnte die Arretierhilfe von der Retention gelöst und die Form vorsichtig, mit der stumpfen Seite eines Gipsmessers, vom Gips gedrückt werden (Abb. 20 und Abb. 21). Der so hergestellte Prüfkörper härtete für 48 h in einem Trockenschrank bei 37 °C aus. Im nächsten Schritt folgte das Angießen des Artikulationsgipses. Die dazu verwendete 60 mm hohe Form musste zunächst dünn mit Vaseline bestrichen werden (Abb. 23). Eine Isolierung des Hartgipsprüfkörpers erfolgte nur im oberen Drittel der Außenfläche um spätere Überstände des Artikulationsgipses leichter entfernen zu können (Abb. 22). Verunreinigungen der Kontaktoberflächen waren auf jeden Fall zu vermeiden. Als nächstes folgte die Fixierung der 60 mm Form auf dem Hartgipsprüfkörper mit Hilfe einer Rohrschelle (Abb. 24). Dabei schloss die Unterseite der Form bündig mit der Unterseite des Gipskörpers ab (Abb. 25 und Abb. 26). Die Verarbeitung des Artikulationsgipses wurde nach den entsprechenden Herstellervorgaben durchgeführt (Abb. 27). Im nächsten Schritt konnte unter Nutzung des Rüttlers die Form gefüllt (Abb. 28) und die Arretierhilfe mit einer zweiten angeschraubten Retention eingebracht werden. Dabei spielte wieder die korrekte Position von Retention zur Gipsform (Abb. 29) und eine zügige Arbeitsweise eine entscheidende Rolle. Nach 10 min konnte die Form mit der Rohrschelle entfernt werden (Abb. 30 und Abb. 31). Überschüsse des Artikulationsgipses auf dem Typ 3 und Typ 4 Gips wurden umgehend und vorsichtig mit einem scharfen Gipsmesser entfernt (Abb. 32). Nach einer Stunde Trockenzeit bei Raumtemperatur stand der nun fertige Prüfkörper zur Verfügung (Abb. 33 und Abb. 34).

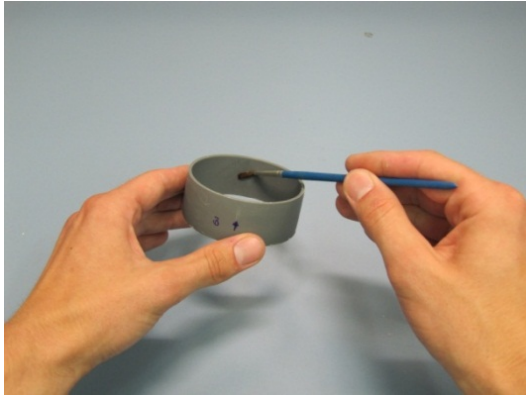


Abb. 14 Isolierung der Gipsform

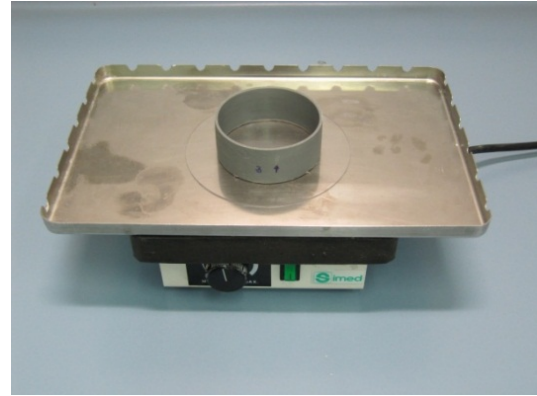


Abb. 15 Vorbereitete Gipsform

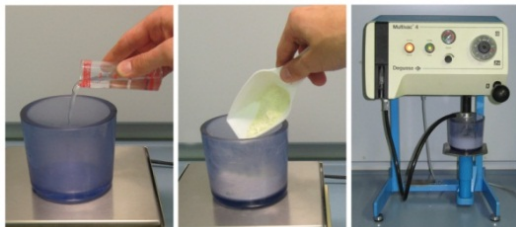


Abb. 16 Anmischen des Modellgipses

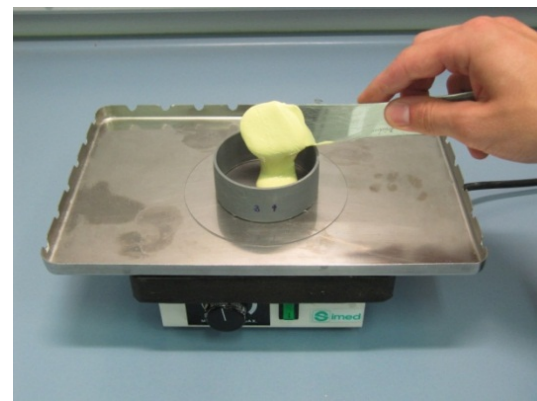


Abb. 17 Befüllen der Gipsform

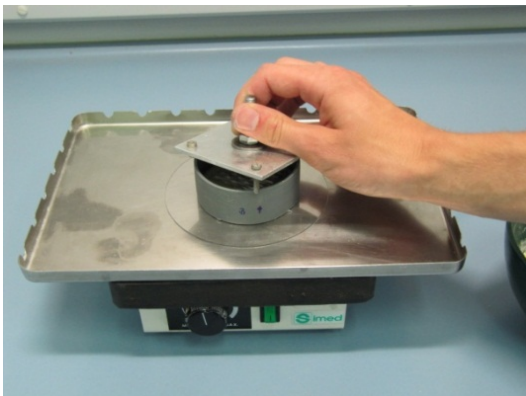


Abb. 18 Einbringen der Arretierhilfe

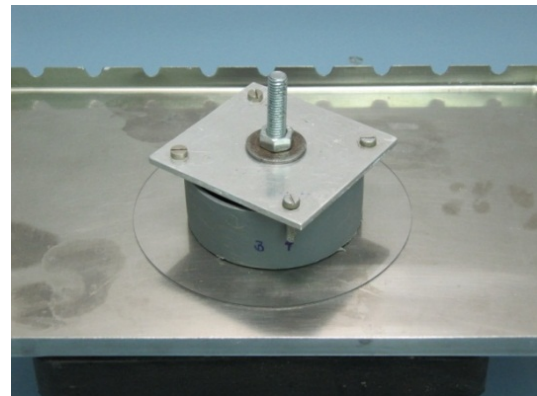


Abb. 19 Richtig positionierte Arretierhilfe



Abb. 20 Erstarrender Gips in der Form

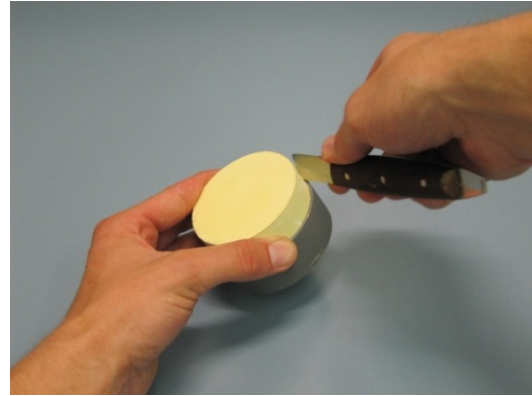


Abb. 21 Entfernung der Gipsform

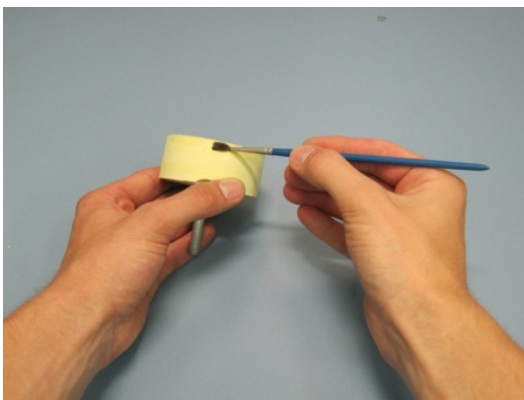


Abb. 22 Isolierung des
Gipskörperandes



Abb. 23 Isolierung der Gipsform

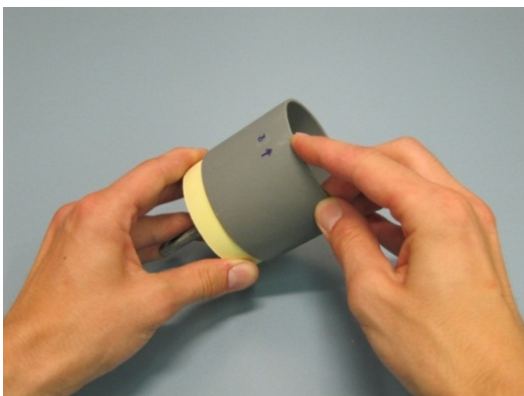


Abb. 24 Positionierung der Gipsform



Abb. 25 Befestigung der Form mittels
Schelle

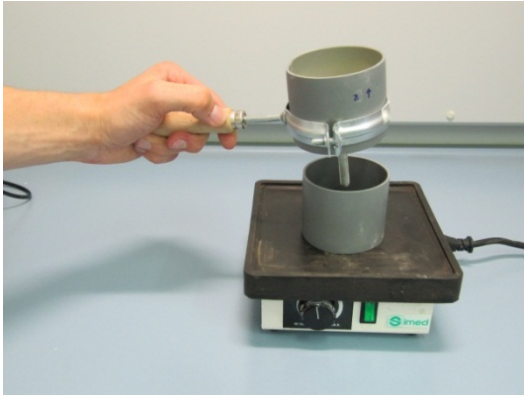


Abb. 26 Hilfsmittel zur Stabilisierung der Form auf dem Rüttler

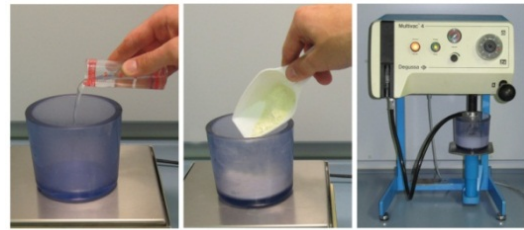


Abb. 27 Anmischen des Artikulationsgipses

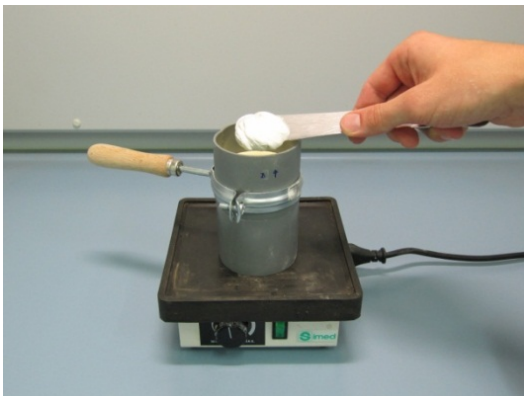


Abb. 28 Befüllen der Gipsform

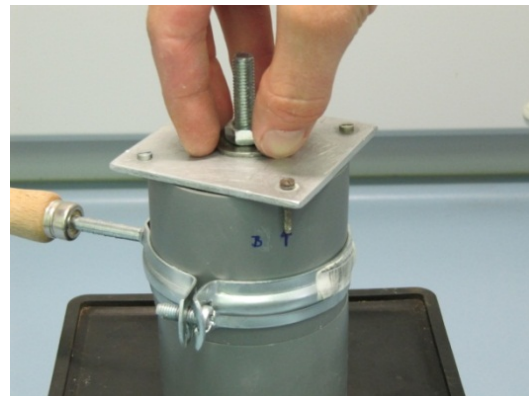


Abb. 29 Richtig positionierte Arretierhilfe



Abb. 30 Entfernen der Arretierhilfe



Abb. 31 Entfernen der Gipsform

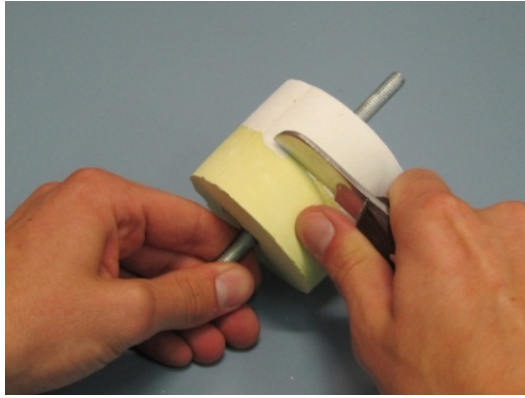


Abb. 32 Entfernen der Gipsüberschüsse

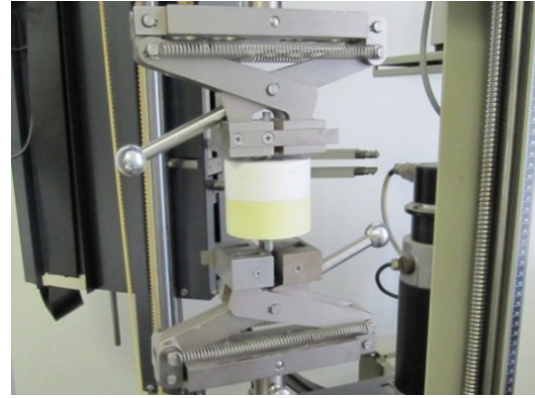


Abb. 33 Prüfkörper in
Universaltestmaschine vor dem
Zugversuch

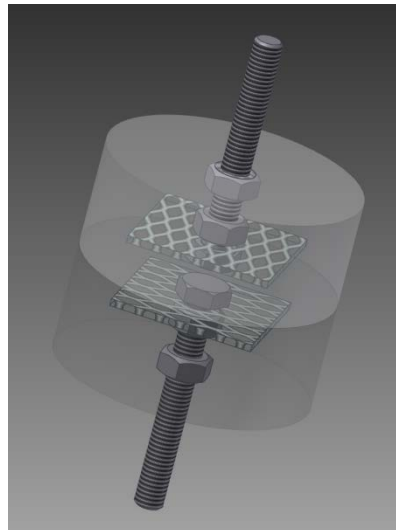


Abb. 34 Fertiger Prüfkörper

4.2.5 Versuchsdurchführung

Nach dem oben beschriebenen Herstellungsverfahren standen die Prüfkörper aus Typ 3 beziehungsweise Typ 4 Gips und Artikulationsgips für den Zugversuch bereit. Zunächst musste die Universaltestmaschine in die Startposition gebracht werden. Zur Installation des Prüfkörpers wurde die Schraube des Hart- oder Superhartgipses in die untere Klemmzange gespannt, danach die Schraube auf der Seite des Artikulationsgipses in die obere Klemmzange (Abb. 20). Hierbei war stets auf eine senkrechte Position des Prüfkörpers in der Zugvorrichtung zu achten, um beim Versuch auftretende Scherkräfte zu minimieren. Wurde diese Bedingung erfüllt, konnte der Versuch mit der Prüfvorschrift „Zugversuch Typ 3/4 - Arti-Gips“ (Punkt 4.5.5) gestartet werden. Der Versuch galt als abgeschlossen, wenn es zur Trennung des Prüfkörpers an der Grenzfläche zwischen Hart- oder Superhartgips und Artikulationsgips kam oder die Retention innerhalb eines Gipses ausriss.

4.2.6 Statistische Auswertung

Die gewonnenen Ergebnisse wurden mit dem Programm SPSS Statistics 17.0 Version 17.0.0 (23.08.2008) (IBM Corporation, New York, USA) ausgewertet und analysiert.

Für statistische Analysen mit einem geeigneten Test ist es erforderlich, die einzelnen Gruppen auf eine Normalverteilung zu prüfen. Dies wurde entsprechend des Probenumfangs mit dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest durchgeführt. Um den β -Fehler klein zu halten, wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit (α^*) entsprechend groß gewählt ($\alpha^* \approx 40\%$). Eine Normalverteilung besteht, wenn $p \geq \alpha^*$ beziehungsweise $p \geq 0,4$ beträgt. Auf Grundlage der gegebenen Voraussetzungen zeigt ein multipler paarweiser Vergleichstest ob signifikante Unterschiede zwischen den Gipskombinationen vorliegen. Für den Fall $p \leq \alpha$ ($\alpha = 0,05$) ist die Nullhypothese abzulehnen und von einem signifikanten Unterschied auszugehen.

5 Ergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse resultieren aus der Untersuchung von vier Artikulationsgipsen die in jeweils 10 Versuchen auf ihre Adhäsionskraft an einem Typ 3 und Typ 4 Gips getestet wurden. In den Darstellungen werden für die Gipskombinationen folgende Abkürzungen verwendet:

Tab. 7 Zuordnung der Gipskombinationen

dentona [®] dento-dur [®] 110 &	dentona [®] arti-base [®] 60	A-I
	Kerr [™] Snow White Plaster No. 2	A-II
	picodent [®] A50	A-III
	AmannGirrbach: Artifix [®]	A-IV
dentona [®] sockel-plaster [®] GT 160 &	dentona [®] arti-base [®] 60	B-I
	Kerr [™] Snow White Plaster No. 2	B-II
	picodent [®] A50	B-III
	AmannGirrbach: Artifix [®]	B-IV

Die ermittelten Messwerte [N] sind in Tab. 8 und Tab. 9 zusammengefasst.

Tab. 8 Messergebnisse Typ 3 Gips

Versuch	A-I	A-II	A-III	A-IV
1	1195,54	888,70	1119,12	528,07
2	1159,72	837,99	883,87	576,98
3	2361,66	807,94	1584,97	595,54
4	2173,97	1010,91	846,35	298,18
5	2229,90	792,79	652,49	482,56
6	1829,91	1031,26	657,13	392,92
7	2481,41	955,58	505,87	497,23
8	1917,52	758,82	856,99	481,26
9	2820,75	870,80	640,90	581,72
10	1337,31	741,87	562,23	525,27

Tab. 9 Messergebnisse Typ 4 Gips

Versuch	B-I	B-II	B-III	B-IV
1	1006,51	559,93	1541,09	696,88
2	1270,11	475,09	905,42	1940,85
3	2477,65	969,77	1332,18	2113,22
4	870,83	968,05	1680,02	1242,42
5	1177,03	855,64	659,93	631,33
6	1065,28	903,52	887,63	1296,20
7	1242,82	996,34	1945,51	996,60
8	749,50	838,20	784,68	1614,40
9	569,81	1035,93	2196,07	2410,98
10	1379,10	667,16	567,42	1183,51

Bei folgenden Versuchen kam es zu einem Abriss auf Höhe der im Artikulationsgips eingebetteten Retention (Abb. 35): A-I/5, A-I/7, A-II/7, B-I/3, B-II/1, B-II/3 bis 9 und B-IV/3.

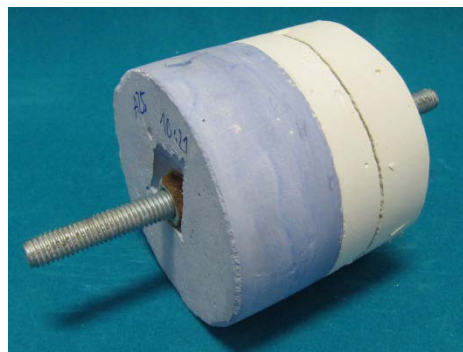


Abb. 35 Kohäsiver Abriss im Artikulationsgips

Der Versuch A-I/4 zeigte einen kohäsiven Frakturmodus an der Grenzfläche der Gipse (Abb. 36).



Abb. 36 Kohäsive Frakturstelle an der Grenzfläche

Aus den erhobenen Daten konnte ein Ranking der Mittelwerte erstellt werden (Abb. 37). Sowohl der höchste als auch niedrigste Wert wurde in Verbindung mit dem Typ 3 Sockelgips erreicht. Insgesamt besteht zwischen Erst- und Letztplatziertem ein Unterschied von 1454,80 N. Die Kombinationen mit Typ 4 Sockelgips liegen in ihren Mittelwerten dichter beieinander. Hier beträgt die größte Differenz 585,68 N.

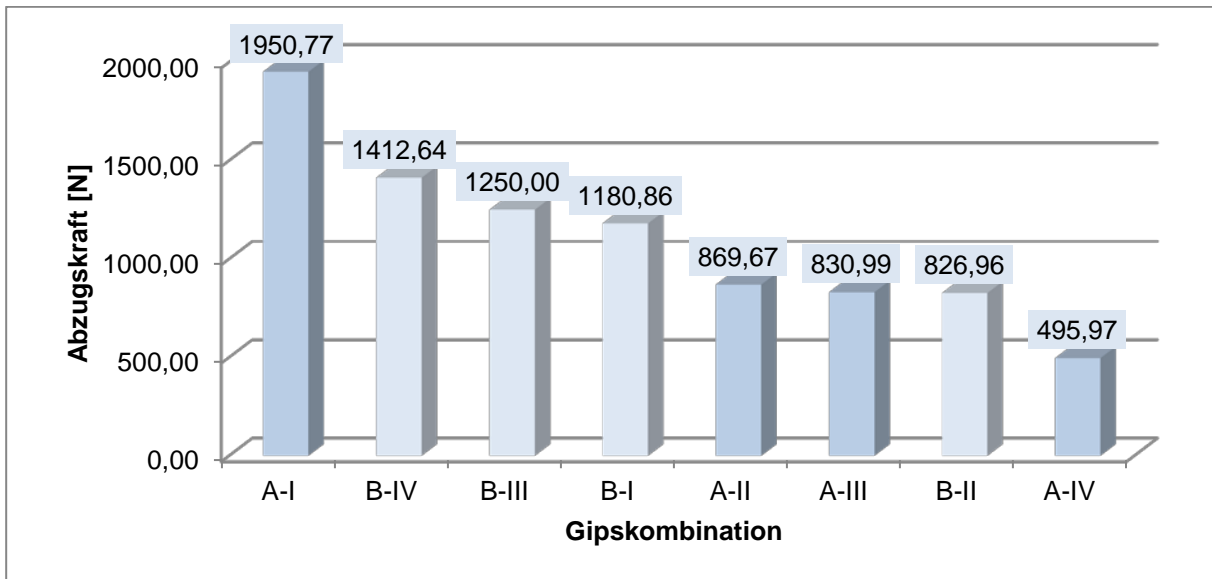


Abb. 37 Ranking der Mittelwerte

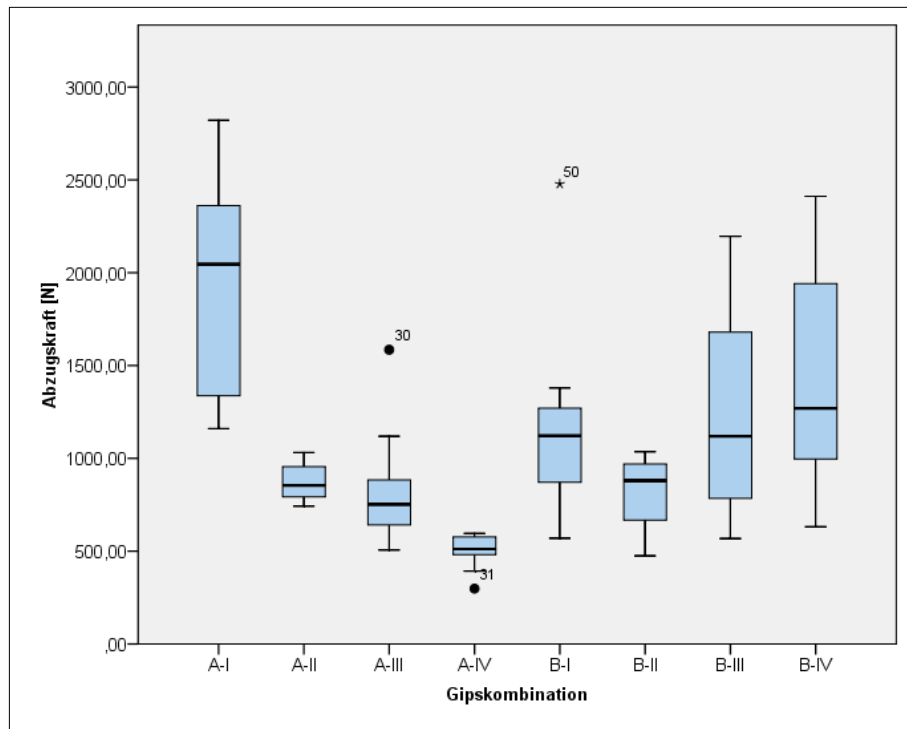


Abb. 38 Boxplot Gipskombinationen

Tab. 10 Mittelwerte, Konfidenzintervall und Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

Kombination	Mittelwert [N]	Konfidenzintervall (95%) [N]	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest p
A-I	1950,77	(1543,08 - 2358,46)	0,962
A-II	869,67	(796,88 - 942,44)	0,997
A-III	830,99	(600,87 - 1061,12)	0,640
A-IV	495,97	(430,29 - 561,65)	0,632
B-I	1180,86	(808,99 - 1552,74)	0,552
B-II	826,96	(687,89 - 966,03)	0,702
B-III	1250,00	(841,42 - 1658,57)	0,682
B-IV	1412,64	(986,21 - 1839,07)	0,911

Die Werte für jede Gruppe sind laut Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest normalverteilt (Tab. 10).

Tab. 11 t-Test bei unabhängigen Stichproben

Gipskombination	t-Test bei unabhängigen Stichproben p-Wert
A-I / B-I	0,397
A-II / B-II	0,062
A-III / B-III	0,021
A-IV / B-IV	0,000

Bei zwei Artikulationsgipsen zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen der Verwendung von Typ 3 und 4 Modellgips. So erreichten picodent[®] A50 und AmannGirrbach Artifix[®] mit dem Typ 4 dentona[®] sockel-plaster[®] GT 160 signifikant bessere Messwerte als mit Typ 3 dentona[®] dento-dur[®] 110 (Tab. 11). Der Levene-Test auf Varianzhomogenität für die Typ 3 Gipskombinationen ergab einen p-Wert von <0,0005, für die Typ 4 Kombinationen einen p-Wert von 0,035 und für den Vergleich aller Kombinationen einen p-Wert von <0,0005. Von einer Varianzhomogenität ist damit nicht auszugehen. Aufgrund der Voraussetzungen und der geringen Probenanzahl folgte der multiple paarweise Vergleichstest Dunnett's T3. Für den Fall $p \leq \alpha$ ist die Nullhypothese abzulehnen ($\alpha = 0,05$).

Tab. 12 Dunnett's T3 Vergleichstest Typ 3 Gips

p-Werte Gipskombination	A-I	A-II	A-III
A-II	0,001	-	-
A-III	0,001	0,999	-
A-IV	0,000	0,000	0,050

Tab. 13 Dunnett's T3 Vergleichstest Typ 4 Gips

p-Werte Gipskombination	B-I	B-II	B-III
B-II	0,308	-	-
B-III	1,000	0,230	-
B-IV	0,920	0,069	0,987

Tab. 14 Dunnett's T3 Vergleichstest Typ 3 und 4 Gips

p-Werte Gipskombination	A-I	A-II	A-III	A-IV
B-I	0,119	0,768	0,825	0,045
B-II	0,002	1,000	1,000	0,008
B-III	0,253	0,662	0,695	0,045
B-IV	0,668	0,274	0,288	0,017

Zwischen den Artikulationsgipsen in Kombination mit dem Typ 3 Sockelgips bestehen signifikante Unterschiede bei den Abzugskräften (Tab. 12). Einzige Ausnahme bildet der Vergleich von KerrTM Snow White Plaster No. 2 mit picodent[®] A50. Diese unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Betrachtet man den Vergleich der Typ 4 Gipskombinationen, so wird deutlich, dass sich keine der Kombinationen signifikant voneinander unterscheidet (Tab. 13). Weiterhin ergaben sich bei der statistischen Analyse aller Gruppen signifikante Unterschiede zwischen A-I/B-II und A-IV mit B-I, B-II, B-III sowie B-IV (Tab. 14). Alle anderen Gipskombinationen unterschieden sich nicht signifikant, sodass in diesen Fällen die Nullhypothese beibehalten wird.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methode

6.1.1 Auswahl der Gipse

Die zur Untersuchung ausgewählten Artikulationsgipse werden häufig in zahntechnischen Laboren verwendet. Dies ergab eine Umfrage unter Dentallaboren im Großraum Leipzig (interne Recherche, unveröffentlicht). Die Modellgipse der dentona[®] AG Dortmund finden ebenfalls zahlreiche Verwendung. Somit sind die gewählten Kombinationen aus je einem Modell- und Artikulationsgips auch in die Praxis übertragbar. Mit den gewonnenen Ergebnissen kann weiterhin eine Empfehlung für die Verwendung einzelner Gipspaarungen gegeben werden.

6.1.2 Anfertigung der Prüfkörper

Die Anfertigung der Prüfkörper erforderte ein praktikables Verfahren, welches reproduzierbare Ergebnisse lieferte. Bisher gibt es keine Literaturstellen oder Normen, die eine Methode für diese Anwendung beschreiben. Da die Erhebung der Messwerte auf einem Zugversuch beruht, musste zunächst eine Schnittstelle zwischen der Universaltestmaschine und dem Gipsprüfkörper gefunden werden. Mithilfe eines eingegossenen Streckmetallgitters an einer massiven Maschinenschraube ist dies gelungen. Die Schwierigkeit dieses Retentionsmechanismus bestand in der senkrechten und zentrischen Einbettung in den Gips. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, besteht die Gefahr der Verfälschung der Messwerte. An der Grenzfläche zwischen Modell- und Artikulationsgips könnte so eine zusätzliche Scherkraft wirken, die gegebenenfalls zu einem vorzeitigen Abriss führt. Durch die Verwendung der unter 4.2.2.2 beschriebenen Arretierhilfe sollten Abweichungen der Richtung verhindert werden. Um mögliche Fehler zu reduzieren, wurden alle Gipsprüfkörper mit derselben Arretierhilfe und vom selben Anwender angefertigt. Weiterhin war die Zuordnung dieser auf den Gipsformen durch Markierungen gekennzeichnet. Eine weitere Herausforderung bei der Anfertigung der Gipsprüfkörper stellte die Gestaltung der

Grenzfläche zwischen dem Modell- und Artikulationsgips dar. Alle Typ 3 und 4 Gipsprüfkörper mussten dieselbe Qualität an dieser Fläche erhalten. Um Verunreinigungen und Einschlüsse auszuschließen, wurde jeder Modellgipsprüfkörper auf einer neuen Tiefziehfolie angefertigt. Zusätzlich konnte damit das Ausgießen eines Modells in einer Kunststoff-Sockelform simuliert werden. Um sicherzustellen, dass Modellsockel in der Praxis eine vergleichbar große Grundfläche haben, wurden die standardisierten Sockelformer von SAM[®] (SAM[®] Präzisionstechnik GmbH, Gauting) (49,47 cm²) sowie AmannGirrbach giroform[®] Sockelplatte (AmannGirrbach AG, Koblach) (36,60 cm²) vermessen. Die verwendeten Rohre zur Formherstellung weisen eine Innenfläche von 39,59 cm² auf. Somit sind die hergestellten Prüfkörper mit Modellen in der Praxis vergleichbar, vorausgesetzt die Oberflächen sind glatt und nicht verunreinigt.

6.1.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung mittels Zugversuch in der Universaltestmaschine erfolgte bis zum Abriss der Gipsprüfkörper an deren Grenzfläche. Bei der Montage des Prüflings war besonders auf eine korrekte, senkrechte und zentrische Position zu achten. Wie oben beschrieben, sollten Scherkräfte an den Gipsgrenzflächen vermieden werden. Bei 13 der 80 Versuche kam es nicht zum Abriss an der Gipsgrenzfläche. An diesen Proben erfolgte der Abriss im Artikulationsgips auf Höhe der eingebetteten Retention. Von diesen 13 Proben stammen 8 Proben aus der Kombination dentona[®] sockel-plaster[®] GT 160 mit Kerr[™] Snow White Plaster No. 2. Vermutlich liegt die Adhäsionskraft an der Gipsgrenzfläche in diesem Fall über der Kohäsionskraft des Artikulationsgipses, was für einen hohen Haftverbund spricht. Der Mittelwert dieser Versuchsreihe lag bei 826,96 N. Eine Verlängerung der Abbindezeit des Kerr[™] Snow White Plaster No. 2 hätte möglicherweise zu höheren Messwerten geführt. Die anderen 5 Proben mit einem Abriss im Prüfkörper traten bei allen getesteten Artikulationsgipsen auf, jedoch nicht bei Paarungen mit picodent[®] A50. Die Messwerte lagen dabei stets zwischen 2100 N und 2500 N und lassen vermuten, dass bei dieser Zugkraft die Kohäsionskraft der Artikulationsgipse, eine Stunde nach Abbindezeit, überschritten wurde. Die angewandte Versuchsdurchführung erscheint ab diesem Zugkraft-Niveau nicht mehr geeignet zu

sein. Ob eine Umgestaltung der im Gips eingebetteten Retention höhere Messwerte erreicht oder eine Verlängerung der Abbindezeit des Artikulationsgipses den beobachteten Effekt ausschließt, bleibt fraglich. Weiterhin konnte bei einer Paarung dentona® dento-dur® 110 mit dentona® arti-base® 60 ein kohäsiver Defektanteil an der Grenzfläche festgestellt werden. Dies deutet auf einen sehr hohen Verbund der Gipse hin. Da lediglich eine Probe den Effekt aufwies, ist aber von einer zufälligen Beobachtung auszugehen. Mit der beschriebenen Methode könnten in weiteren Untersuchungen die Adhäsionskräfte weiterer Gipskombinationen untersucht werden. Auch Veränderungen an den Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel der Zeitraum bis zum Zugversuch, die Befeuchtung der Gipsoberfläche vor dem Angießen des Artikulationsgipses oder die Gestaltung der Gipsrenzflächen mit Retentionsmustern sind denkbar.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Bisher existieren keine Literaturstellen und Messwerte, die die Adhäsion von Artikulationsgipsen beschreiben. Daher kann ein Vergleich zu anderen Untersuchungen nicht gezogen werden.

Keiner der 80 erhobenen Messwerte wurde ausgeschlossen. Die beobachteten Abrisse an der, im Artikulationsgips eingebetteten Retention, stellten eine Besonderheit dar. Da es sich bis auf die Kombination von dentona® sockel-plaster® GT 160 mit Kerr™ Snow White Plaster No. 2 um Einzelfälle in den Gruppen handelte, wurden diese Werte nicht ausgeschlossen. Wie in

Abb. 38 und Tab. 10 zu erkennen ist, zeigten sich unterschiedlich breite Konfidenzintervalle der Gipskombination. In den Gruppen A-I, B-III und B-IV weist dies auf eine starke Variabilität der ermittelten Werte hin. Die anderen Kombinationen weisen ein schmaleres Konfidenzintervall auf. Die Streuung der ermittelten Werte ist möglicherweise auf Fehler während der Probenherstellung (z.B. nicht exakt zentrische Einbettung der Retention, Verzögerung beim Einbringen des Gipses in die Form) oder auch unterschiedliche Kristallformationen an der Probenoberfläche zurückzuführen. Mittels Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

konnte die Normalverteilung der Messwerte in den jeweiligen Gruppen bestätigt werden. Dies untermauert neben der oben beschriebenen Streuung die Eignung der neu entwickelten Methode. Mit der Normalverteilung ist die Voraussetzung für den t-Test bei unabhängigen Stichproben gegeben. Mit dieser Analyse wurden von jedem Artikulationsgips die Werte mit Typ 3 gegen die des Typ 4 Gips verglichen und auf eine Signifikanz hin untersucht. Dabei lautet die Nullhypothese (H_0): „Es ist egal ob man Typ 3 oder Typ 4 Gips als Sockelgips verwendet“. Falls $p \leq \alpha$, war die Nullhypothese abzulehnen ($\alpha = 0,05$). In dieser Analyse konnte nicht festgestellt werden, dass der Typ 3 gegenüber dem Typ 4 Modellgips signifikant bessere Werte an einem Artikulationsgips aufweist. Um einen multiplen Vergleich der Gipskombinationen A-I bis A-IV und B-I bis B-IV mit der Nullhypothese „Es gibt keinen Unterschied zwischen den getesteten Artikulationsgipsen (in Kombination mit Typ 3 oder 4 Gips).“ durchzuführen, musste zunächst geprüft werden, ob in den Gruppen eine Varianzhomogenität vorliegt. Dazu diente der Levene-Test. Es lag bei allen Gruppen keine Homogenität der Varianzen vor. Aufgrund dieser Voraussetzungen und des relativ kleinen Probenumfang, folgte der multiple paarweise Vergleichstest Dunnett's T3. Falls $p \leq \alpha$, war die Nullhypothese abzulehnen ($\alpha=0,05$). Die Auswertungen zeigten signifikante Unterschiede einiger Gipskombinationen. Dabei konnte in den Kombinationen mit Typ 4 Modellgips kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Artikulationsgipsen festgestellt werden. Beim Vergleich aller Kombinationen untereinander zeigte sich, dass nur wenige Zusammenstellungen signifikant besser beziehungsweise schlechter abschnitten als die Mehrheit der ausgewählten Gipskombinationen.

Um das unterschiedliche Haftvermögen der Gipsoberflächen aneinander zu erklären, ist die Kristallformation des Calciumsulfats zu untersuchen. Zum einen ließe sich der Verbund der Gipse durch eine mechanische Adhäsion begründen. Betrachtet man eine Gipsoberfläche, so erscheint diese makroskopisch glatt. Mikroskopisch wird jedoch die kristalline Struktur der Calciumsulfatmoleküle deutlich. Trägt man auf die Oberfläche eines abgebundenen Gipses A einen weiteren Gips B auf, so ist anzunehmen, dass sich der Gipsbrei B (Halbhydrat mit Wasserüberschuss) bei der Umwandlung zu Dihydrat mit seinen wachsenden Kristallisationskeimen in den bereits vorhandenen Dihydratkristallen des Gipses A verhakt und es zu einer mechanischen Verklammerung der unterschiedlichen Gipskristalle kommt. Weiterhin stellte Zimmermann (1991) mittels Röntgendiffraktometrie fest, dass eine

Gipsoberfläche nicht vollständig aus abgebundenen Gips, also Dihydrat, besteht. Es zeigten sich im Dihydrat eingeschlossene Halbhhydratkristalle die zu einer Steigerung der Oberflächenhärte führten. Dass die Wässerung von bereits abgebundenem Gips diese Halbhhydratkristalle abbinden lässt und dadurch die Oberflächenhärte reduziert wird, konnte Zimmermann ebenfalls in seiner Untersuchung nachweisen. Stellt man sich nun einen abgebunden Gips A mit den eingeschlossenen Halbhhydratkristallen an der Oberfläche vor (Abb. 39, ①), so könnte ein aufgetragener Gipsbrei B mit seinem Wasserüberschuss die Halbhhydrate aus A zum Abbinden bringen (Abb. 39, ②). Durch die wachsenden und sich vernetzenden Kristallisationskeime könnte ein oberflächenübergreifender Verbund entstehen. Exemplarisch ist das beschriebene Modell in Abb. 39, ③ dargestellt.

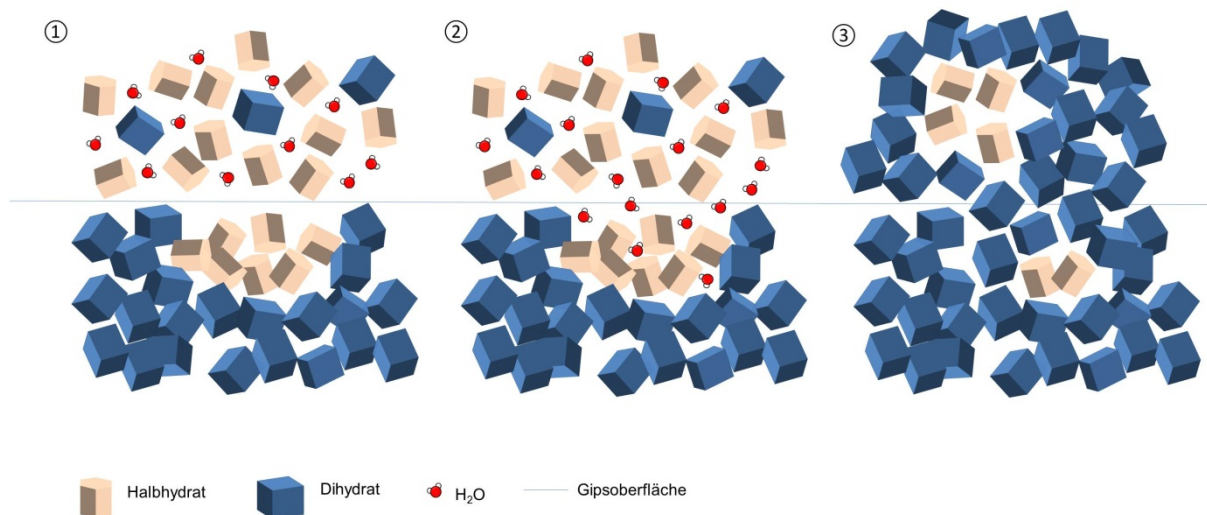


Abb. 39 Modelldarstellung des oberflächenübergreifenden Verbunds zweier Gipse

Aufgrund dieser Hypothesen wurden exemplarisch REM-Aufnahmen der Gipsgrenzflächen angefertigt. Zur Verwendung kam ein Artikulationsgips (Betahalbhydrat, sehr feine, nadelartige Einzelkristalle) und ein Typ 3 Modellgips (Alphahalbhydrat, grobkristalline und kompaktere Partikel). Zwischen den Gipsen konnte keine eindeutige Grenzfläche festgestellt werden. Es zeigte sich ein diffuser Übergang der Kristalle ineinander (Abb. 8). Im Randbereich der Aufnahme sind die spezifischen Gipskristallstrukturen zu unterscheiden, diese verschmelzen in der Bildmitte. Dies spricht für die These der Verklemmung und Verhakung der Gipskristalle. So könnten Gipse, die sich in Ihrer Oberflächen-Kristallkonfiguration

und -form ähnlich sind, höhere Adhäsionswerte im Zugversuch erreichen als Gipskombinationen, die sich deutlich in ihrer Struktur unterscheiden. Ein Beispiel dafür könnte der hohe Verbund des dentona[®] dento-dur[®] 110 mit dem dentona[®] artibase[®] 60 sein. Beide Gipse bestehen nach Herstellerangaben aus 70 bis 100 % eines Alphahalbhydrats. Die Kombination des dentona[®] dento-dur[®] 110 mit dem Kerr[™] Snow White Plaster No. 2 (Betahalbhydrat) erreichte hingegen signifikant niedrigere Abzugskräfte als die oben genannte Kombination. Dies ist jedoch eine einzelne Betrachtung. Dem Verbund der Gipskristalle könnte in einer systematischen, mikrostrukturellen Untersuchung nachgegangen werden.

In Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich Gipskristalle beim Abbinden auf Abformmaterialien unterschiedlich ausrichten (Breker und Förster 1996; Vogel et al. 1998). Man könnte also auch annehmen, dass die Oberfläche auf die der Modellgips gegossen wird, einen indirekten Einfluss auf die spätere Adhäsionskraft mit einem Artikulationsgips hat. Da moderne Dentalgipse meist kunststoffvergütet sind, bleibt der Einfluss dieser Beimengung offen. Um die aufgestellten Hypothesen nachzuweisen sind weiterführende Untersuchungen mit geeigneter Methodik notwendig.

Zusammenfassend könnte beim Verbund Gips-Gips von drei Mechanismen der mechanischen Adhäsion ausgegangen werden: zunächst die sichtbare Makro-Retention, die auf eingearbeiteten Formen und Unterschnitten basiert, weiterhin die Mini-Retention, auf der Verklebung der oberflächigen Gipskristalle beruht und die Micro-Retention, die durch Umwandlung der Halbhydrat-Kristall-Inseln einen oberflächenübergreifenden Verbund zum aufgetragenen Gips herstellt.

Für den klinischen Alltag scheint es empfehlenswert zu sein, Kombinationen von Artikulations- und Modellgips zu wählen, die aufeinander abgestimmt sind. Beim vorzeitigen Ablösen des Modells vom Artikulationsgips sollte auch eine ungünstige Gipspaarung in Betracht gezogen werden. Inwieweit eine Wässerung des Modells oder eingearbeitete Retentionen die Adhäsion zwischen den Gipsen verbessert, sollte mit der verwendeten Methodik in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

7 Schlussfolgerungen

Es zeigte sich, dass die neu entwickelte Methode für die Untersuchung der Haftfähigkeit von Artikulationsgipsen geeignet ist. Aneinander gegossene Artikulations- und Modellgipse erreichten unterschiedlich hohe Adhäsionskräfte. Einzelne Gipskombinationen hafteten signifikant besser aneinander als andere. Ein Vorteil für die Verwendung des Typ 3 gegenüber dem Typ 4 Modellgips ergab sich innerhalb der getesteten Paarungen nicht. Die Kristallstruktur der jeweiligen Gipse scheint einen Einfluss auf den Haftverbund zu haben. Ähnlich konfigurierte Gipskristalle könnten höhere Adhäsionskräfte aufweisen. Am besten erschien in dieser Untersuchung die Kombination von dentona[®] dento-dur[®] 110 und dentona[®] arti-base[®] 60.

8 Zusammenfassung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. med. dent.

Titel: Adhäsionskräfte von Artikulationsgipsen an Typ 3 und 4 Modellgips. Eine in vitro Studie

eingereicht von: Julian Brückner

angefertigt an: Universität Leipzig, Medizinische Fakultät
Universitätszahnmedizin Leipzig
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde

betreut von: Prof. Dr. med. dent. Holger A Jakstat

eingereicht im: Februar 2014

In der vorliegenden Arbeit sollte die Fragestellung untersucht werden, wie hoch die Haftfähigkeit von Artikulationsgips an Modellgips ist und inwieweit sich einzelne Kombinationen voneinander unterscheiden. Da bisher keine Norm zur Quantifizierung existiert, wurde eine Methode entwickelt die mittels Zugversuch die Adhäsionskraft messbar machte. Zur Untersuchung wurden Artikulationsgipse (dentona[®] arti-base[®] 60, picodent[®] A 50, AmannGirrbach Artifix[®] und Kerr[™] Snow White Plaster No. 2) an je einen Typ 3 (dentona[®] dento dur[®] 110) und Typ 4 Modellgips (dentona[®] sockel-plaster[®] GT 160) gegossen. Die zylindrischen Prüfkörper mit einer Oberfläche von ca. 40 cm² enthielten zentrisch eingegossene Retentionen, die zur Verankerung in einer Universalprüfmaschine dienten. Prüfkörper aus Typ 3 und Typ 4 Gips trockneten vor dem Angießen des Artikulationsgipses 48 h. Die Messung der Adhäsionskraft (in N) erfolgte mittels Zugversuch, 1 h nach der Erstarrung des Artikulationsgipses. Für jede Kombination wurden 10 Versuche durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgte mittels t-Test bei unabhängigen Stichproben und Dunnett's T3 Vergleichstest ($\alpha=0,05$). Aus den 80 ermittelten

Werten konnte ein Ranking der Gipskombinationen erstellt werden (Max. 1950 N, Min. 496 N). Es zeigte sich, dass die neu entwickelte Methode für die Untersuchung der Haftfähigkeit von Artikulationsgipsen geeignet ist. Aneinander gegossene Artikulations- und Modellgipse erreichten unterschiedlich hohe Adhäsionskräfte und unterscheiden sich zum Teil signifikant. Ein Vorteil, in Bezug auf die Adhäsion, für die Verwendung des Typ 3 gegenüber dem Typ 4 Modellgips ergab sich innerhalb der getesteten Kombinationen nicht. Die Kristallstruktur der jeweiligen Gipse scheint dabei einen Einfluss auf den Haftverbund zu haben. Ähnlich konfigurierte Gipskristalle könnten durch eine starke interkristalline mechanische Verbindung höhere Adhäsionskräfte aufweisen. Am besten erschien in dieser Untersuchung die Kombination von dentona[®] dento-dur[®] 110 und dentona[®] arti-base[®] 60.

9 Literaturverzeichnis

Abriel, W.; Nesper, R. (1993): Bestimmung der Kristallstruktur $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_{0,5}$ mit Röntgenbeugungsmethoden und mit Potentialprofil-Rechnungen. In: *Zeitschrift für Kristallographie* 1993 (205), S. 99–113. Online verfügbar unter http://rruff.info/doclib/zk/vol205/ZK205_99.pdf.

AmannGirrbach GmbH (2009): Sicherheitsdatenblatt Artifix / Artikelnummer 711217. Hg. v. AmannGirrbach GmbH. Pforzheim. Online verfügbar unter http://www.amanngirrbach.com/fileadmin/_agweb_2011/media/downloads/Sicherheit_sdatenblaetter/MM/Artifix_711217_DE.pdf.

AmannGirrbach GmbH (2011): Produktkatalog Model Management. Hg. v. AmannGirrbach GmbH. Pforzheim. Online verfügbar unter http://www.amanngirrbach.com/fileadmin/_agweb_2011/media/downloads/Katalog/2011/Model%20Management_Katalog_2011_DE-DV.pdf.

Bader, E. A. (2012): Einfluss verschiedener Desinfektionsmittel auf die Detailwiedergabe und die Oberflächenqualität dentaler Abformwerkstoffe. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle. Medizinische Fakultät. Online verfügbar unter <http://digital.bibliothek.uni-halle.de/download/pdf/1368279?name=Einfluss%20verschiedener%20Desinfektionsmittel%20auf%20die%20Detailwiedergabe%20und%20die%20Ober>.

Barthelmy, D.: Gypsum Mineral Data. Online verfügbar unter <http://webmineral.com/data/Gypsum.shtml>.

Breker, J.; Förster, H.-J. (1996): Besteht eine Modelloberfläche nur aus Kalziumsulfat-Dihydrat? Giuliani-Chernie GmbH, Ludwigshafen.

Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (Hg.) (2006): GIPS-Datenbuch. Darmstadt.

Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2012): Zeiträume mit Gips. Unter Mitarbeit von Forschungsvereinigung der Gipsindustrie e.V. Hg. v. Bundesverband der Gipsindustrie e.V. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.gips.de/wissen/gips-schafft-freiraeume/zeitraeume-mit-gips/die-anfaenge/>.

Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2013): Technischer Gips. REA-Gips. Online verfügbar unter http://www.google.de/imgres?sa=X&biw=1536&bih=760&tbn=isch&tbnid=CWljWkq_K1MK3M:&imgrefurl=http://www.gips.de/wissen/wundermineral-gips/rohstoffe/technischer-gips/&docid=pLoQa1BOnIJ7zM&imgurl=http://www.gips.de/wp-content/uploads/2012/03/wis1.2.2.png&w=900&h=675&ei=QZwxUsCpA4LRtQbAzICwCA&zoom=1&iact=hc&vpx=830&vpy=296&dur=3173&hovh=195&hovw=260&tx=178&ty=98&page=1&tbnh=148&tbnw=169&start=0&ndsp=31&ved=1t:429,r:12,s0,i:121.

Materialnorm EN ISO 6873, 2000: Dentalgipse (ISO 6873:1998).

DeguDent GmbH (2000): Arbeitsanleitung Multivac 4. Hg. v. DeguDent GmbH. Hanau-Wolfgang. Online verfügbar unter http://www.degudent.de/Kommunikation_und_Service/Download/Geraete/Geraete_Direkt/weitere_Geraete/multivac_4.pdf.

dentona AG: arti-base 60. Hg. v. dentona AG. Dortmund. Online verfügbar unter <http://dentona.de/de/produktkatalog/52-artikulationsgipse/54-arti-base-60.html>.

dentona AG: dento-dur 110. Hg. v. dentona AG. Dortmund. Online verfügbar unter <http://dentona.de/de/produktkatalog/44-hartgipse/59-dento-dur-110-.html>.

dentona AG: sockel-plaster GT 160. Hg. v. dentona AG. Dortmund. Online verfügbar unter <http://dentona.de/de/produktkatalog/42-sockelgipse/58-sockel-plaster-gt-160.html>.

dentona AG (2008): Sicherheitsdatenblatt arti-base 60. Hg. v. dentona AG. Dortmund. Online verfügbar unter http://dentona.de/pdf/sicherheitsdatenblaetter/arti-base_REACH.pdf.

dentona AG (2008): Sicherheitsdatenblatt dento-dur 110. Hg. v. dentona AG. Dortmund. Online verfügbar unter http://dentona.de/pdf/sicherheitsdatenblaetter/dentodur_REACH.pdf.

dentona AG (2008): Wissenswertes über dentona® Gipse. Dortmund.

dentona AG (2009): Sicherheitsdatenblatt sockel-plaster GT 160. Hg. v. dentona AG. Dortmund. Online verfügbar unter http://dentona.de/pdf/sicherheitsdatenblaetter/sockelplasterGT_REACH.pdf.

Ernst, S.; Caesar, H. H. (1993): Die Nichtmetalle in der Zahntechnik. Zusammensetzung, chemisches und physikalisches Verhalten bei der Verarbeitung, Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz; Werkstoffkunde. 3. Aufl.; 21.-30. Tsd. München: Verl. Neuer Merkur.

Euro Gypsum (2008): Living with Gypsum: From Raw Material to Finished Products. Online verfügbar unter http://www.eurogypsum.org/_Uploads/dbsAttachedFiles/livingwithgypsum.pdf.

Forg, G.; Haas, J.; Kothe, H.-U.; Limley, E.; Müller, F. (Hg.) (2009): IGB Handbuch Gipsputze Zukunftsaufgabe Bauen im Bestand. Bundesverband der Gipsindustrie e.V. Darmstadt.

Franz, G. (1977): Untersuchung zum Dimensionsverhalten der Hartgipse an linearen Proben und an Kiefermodellen. In: *Dtsch Zahnarztl Z* 32 (12), S. 945–948. Online verfügbar unter http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=340203.

Franz, G. (1979): Über den günstigen Zeitpunkt zur Weiterarbeit auf einem Hartgipsmodell. In: *Dtsch Zahnarztl Z* 34 (9), S. 694–697. Online verfügbar unter http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=292591.

Franz, G. (1981): Dentalgipse. Struktur, Verhalten, Verarbeitung ; mit 29 Tabellen. München: Hanser.

Franz, G. (1981): Hartgipsverarbeitung zur Erzielung präziser Modelle. In: *Dent Labor (Munch)* 29 (1), S. 65–70. Online verfügbar unter http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=6939615.

Gente, M.; Lehmann, K. M.; Rehberg, G. (1988): Basisuntersuchung zum Dimensionsverhalten von Gipsproben. In: *Dtsch Zahnarztl Z* 43 (4), S. 482–486. Online verfügbar unter http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=3165836.

Hamm, H.; Kersten, Dr. H.-J.; Hueller, R. (2004): 25 Jahre Betriebserfahrung mit der Verwendung von REA-Gips in der europäischen Gipsindustrie. In: *Cement International* 2004 (4), S. 92–102.

Hoffmann-Axthelm, W. (1985): Die Geschichte der Zahnheilkunde. 2. Aufl. Berlin, London: Quintessenz.

Prüfnorm ISO/TS 11405, 01.02.2003: Technical Specification ISO/TS 11405 Dental materials -Testing of adhesion to tooth structure.

Jakstat, H. A.; Hässler, C.; Kroszewsky, K. (2006): Zahnärztliche Werkstoffkunde. Ein Arbeitsbuch. Norderstedt: Books on Demand.

Kappert, H. F.; Eichner, K. (2008): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2 Werkstoffe unter klinischen Aspekten. 6. vollst. überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Thieme.

Kerr Italy Spa (2003): Sicherheitsdatenblatt Snow White No. 2. Hg. v. Kerrdental. Italien. Online verfügbar unter <http://www.kerrdental.de/media/135168/SnowWhite2.pdf>.

Kerrdental: Snow White Plaster No.2. Online verfügbar unter <http://www.kerrdental.eu/lab/dental-stones/productfamily/SnowWhitePlaster>.

KerrHawe S.A. (2010): Snow White Plaster No. 2 Abdruckgips Gebrauchsanleitung. Bioggio.

König GmbH: Acrylglas und Kunststoffprodukte: PETG Polyethylenterephthalat. Hg. v. König GmbH. Gilching. Online verfügbar unter <http://www.koenig-kunststoffe.de/kompaktplatten/petg-polyethylenterephthalat.html>.

Kuske, M. (2000): Gipsverarbeitung und Modellsysteme. 1. Aufl. Fuchstal: TW-Media.

Lenz, E.; Welker, D. (1972): Untersuchungen der Abbindeexpansion und des thermovolumetrischen Verhaltens von Einbettmassen. In: *Dtsch Stomatol* 22 (3), S. 161–170. Online verfügbar unter http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=4502724.

Linderer, J. (1851): Die Zahnheilkunde nach ihrem neuesten Standpunkte. Mit 6 Tafeln in Stahlstich. Erlangen: Verlag von J. J. Palm und Ernst Enke.

Marxkors, R. (Hg.) (2010): Lehrbuch der zahnärztlichen Prothetik. Für Studium und Beruf. 5., überarb. und erw. Auflage. Köln: Dt. Zahnärzte-Verl.

Marxkors, R.; Meiners, H. (2005): Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. 5., überarb. und erg. Aufl. Köln: Dt. Zahnärzte-Verl., DÄV.

Müller, M. (2007): Die Abbindebeschleunigung von Stuckgips durch Calciumsulfatdihydrat. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar. Fakultät Bauingenieurwesen.

Omnident Dental-Handelsgesellschaft mbH (2012): Omnident 2012. Hg. v. Omnident Dental-Handelsgesellschaft mbH. Rodgau Nieder-Roden. Online verfügbar unter http://www.dental-union.com/du/flyer/Omnidentkatalog_2012.pdf.

picodent®, Dental-Produktions-und Vertriebs-GmbH: picodent - picodent® A 50 - Artikulationsgipse. Hg. v. Dental-Produktions-und Vertriebs-GmbH picodent®. Wipperfürth. Online verfügbar unter http://www.picodent.de/artikel/543-picodentsupsup_a_50.html?anz=0.

picodent®, Dental-Produktions-und Vertriebs-GmbH (2009): Sicherheitsdatenblatt picodent A50. Hg. v. Dental-Produktions-und Vertriebs-GmbH picodent®. Wipperfürth. Online verfügbar unter http://www.picodent.de/cms/upload/datenblaetter/a_50.pdf.

Pieper, S. (2008): Untersuchungen zum Einfluß von Mikrowellenstrahlung und Druck auf Härte und Expansion von Dentalgipsen. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle. Universitätspoliklinik für Zahnärztliche Prothetik. Online verfügbar unter <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/08/08H165/prom.pdf>.

Pitzschke, S. (2004): Darstellung des Chemiegips-Problems, Prozesse mit Chemiegips, Lösungsmöglichkeiten sowie zukünftige Perspektiven. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden. Fachbereich Maschinenbau/Verfahrenstechnik.

Rapsch, D. (2009): Marley HT-Innenentwässerung. Hg. v. Marley Deutschland GmbH. Wunstorf. Online verfügbar unter http://www.marley.de/uploads/media/Abreissblock_HT_A4_-DE-.pdf.

Rasche, M. (1990): Der Zugscherversuch in der Klebtechnik. In: *Adhäsion* (11), S. 36–43.

Roskill Information Services (Hg.) (2004): The Economics of Gypsum and Anhydride. 9. Aufl. London: Roskill Information Services Ltd.

sartorius AG (2001): Sartorius Masterpro Serie LP-Modelle Elektronische Präzisionswaagen Betriebsanleitung. Göttingen.

Schorn, S. (2013): Mineralienatlas Lexikon - Sandrose. Online verfügbar unter <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Sandrose>.

Simed s.r.l. (2011): Catalogo N. 5. Hg. v. Simed s.r.l. Baranzate. Online verfügbar unter <http://www.dasdental.cz/AkcniNabidka/Simed.pdf>.

Sondermann, U. (Hg.) (1996): Dentalgipse und ihre Anwendungen. Fachtagung am 14. März 1996 anlässlich der Jahrestagung 1996 der Deutschen Gesellschaft für Kristallograpie im Marburg vom 11. bis 14. März 1996 ; Programm ; Begegnung von Industrie, Praxis und Hochschule. Marburg.

Vogel, D.; Follner, H.; Jacobi, H. (1998): Oberflächenstrukturen von polykristallinem Gips abgebunden auf verschiedenen Materialien. Abstract. TU Clausthal, Clausthal. Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe.

Walz, M. (2005): Korrosionsverhalten von Baumetallen mit Baugipsen unter Berücksichtigung von REA-Gips. Universität Stuttgart, Stuttgart. Otto-Graf-Institut.

Weiss, H.; Bräu, M. F. (2009): Wie viel Wasser enthält gebrannter Gips? (19). Online verfügbar unter http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1002/ange.200900726/asset/3572_ft.pdf?v=1&t=hbrw6f04&s=c6f68c5a9f67a10fa71ebd02d8e998ec46a3c3c7.

Wikipedia (Hg.) (2013): Minoische Kultur. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=112318660>.

Wikipedia (Hg.) (2012): Gips. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=111254172>.

Wikipedia (Hg.) (2012): Jericho. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=111726048>.

Wikipedia (Hg.) (2012): Hochtemperaturrohr. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104065974>.

Wikipedia (Hg.) (2012): Philipp Pfaff. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=108868755>.

Wirz, J.; Schmidli, F. (1994): Modellmaterial Gips Teil I. In: *Quintessenz* 45, S. 85–91.

Wirz, J.; Schmidli, F. (1994): Modellmaterial Gips Teil II. In: *Quintessenz* 45, S. 281–288.

Wirz, J.; Schmidli, F. (1994): Modellmaterial Gips Teil III. In: *Quintessenz* 45, S. 439–446.

Wolf, J.; Sondermann, U.; Lehmann, Klaus M. (1998): Der Nachweis verschiedener Kristallphasen an Gipsoberflächen mittels Röntgendiffraktometrie. In: *Interdisziplin. J. Proth. Zahnheilk* 1 1998, S. 175–178.

Zimmermann, A. (1991): Untersuchungen zur Härte an der Oberfläche von Gipsproben. Marburg. Online verfügbar unter <http://books.google.de/books?id=TU7ptgAACAAJ>.

10 Anhang

Erklärung über die eigenständige Abfassung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, und dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren.

.....

Datum

.....

Unterschrift

Lebenslauf

Leipzig, 21.02.2014

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Julian Brückner, Dr. Siegfried Bratner, Professor Dr. Holger A. Jakstat,
Universitätsklinikum Leipzig AöR, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und
Werkstoffkunde

*„Experimentelle Untersuchung der Adhäsionskräfte von Artikulationsgipsen an Typ 3
und Typ 4 Modellgips mit einer neuen Methode“*

62. Jahrestagung der Deutsche Gesellschaft für Prothetische Zahnmedizin und
Biomaterialien e.V. (DGPro) 2013 (13.06.2013 - 15.06.2013), Hannover
Posterpräsentation mit Vortrag

Julian Brückner, Dr. Siegfried Bratner, Professor Dr. Holger A. Jakstat,
Universitätsklinikum Leipzig AöR, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und
Werkstoffkunde

*„Adhäsionskräfte von Artikulationsgipsen an Typ 3 und Typ 4 Modellgips. Eine
experimentelle Untersuchung mit einer neuen Methode“*

12. Research Festival an der Universität Leipzig (19.12.2013)
Posterpräsentation

Julian Brückner, Syavosh Amirpour, Dr. Tina Rudatzki, Dr. Siegfried Bratner,
Professor Dr. Holger A. Jakstat,
Universitätsklinikum Leipzig AöR, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und
Werkstoffkunde

„Update Gips: Aktuelle Untersuchungen zu Artikulationsgipsen“

63. Jahrestagung der Deutsche Gesellschaft für Prothetische Zahnmedizin und
Biomaterialien e.V. (DGPro) 2014 (15.05.2014 - 17.05.2014), Aachen
angenommene Einreichung Posterpräsentation mit Vortrag

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Holger A. Jakstat danke ich für die Überlassung des Themas, für die konstruktiven Kritiken und guten Vorschläge, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ich danke Herrn Dr. Siegfried Bratner für die vielen anregenden Gespräche und hilfreichen Hinweise bei der Versuchsdurchführung und Abfassung des Themas.

Der Firma dentona[®] AG, picodent[®] und AmannGirrbach[®] danke ich für die Bereitstellung der Gipse.

Bedanken möchte ich mich auch ganz besonders bei meiner Familie, die mich auf meinem Lebensweg immer unterstützt hat.